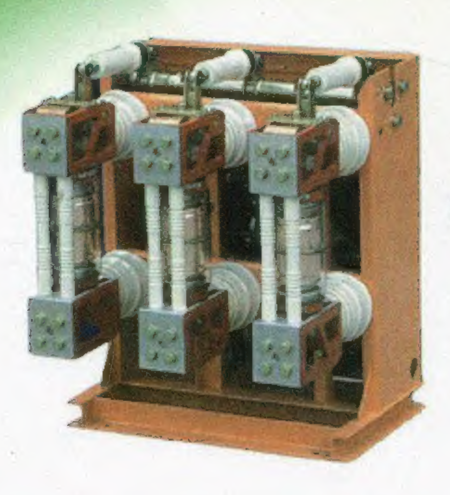
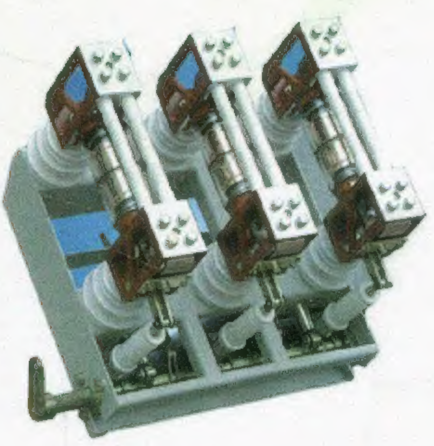
تكنولوجيا الجهد العالي

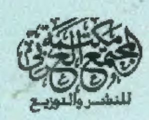
الدكتور المهندس
سامر عزمي عبد الجواد







أعد هذا الكتاب
بالإعتماد على الخطط الجديدة لجامعة البلقاء التطبيقية



تكنولوجيا الجهد العالي

تكنولوجيا الجهد العالي

تاليف

الدكتور المهندس

سامر عزمي عبد الجواد

الطبعة الأولى

2014م – 1435هـ





رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (2013/5/1575)

621.31

عبد الجواد، سامر عزمي

تكنولوجيا الجهد العالي/ سامر عزمي عبد الجواد.- عمان: مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع، 2013

( ) ص

ر.إ.: 2013/5/1575

الواصفات: /الهندسة الكهربائية//الطاقة الكهربائية/

- يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية أخرى.

جميع حقوق الطبع محفوظة

لا يسمح بإعادة إصدار هذا الكتاب أو أي جزء منه أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات أو نقله بأي شكل من الأشكال، دون إذن خطي مسبق من الناشر

عمان – الأردن

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means without prior permission in writing of the publisher.

الطبعة العربية الأولى

2014م–1435هـ



عمان – وسط البلد – ش. السلط – مجمع الفحيص التجاري
تلفاكس 4632739 ص.ب. 8244 عمان 11121 الأردن
عمان – ش. الملكة رانيا العبد الله – مقابل كلية الزراعة – مجمع زهدي حصوة التجاري
www: muj-arabi-pub.com
Email: Moj_pub@hotmail.com



الأردن - عمان - مرج الحمام - شارع الكنيسة - مقابل كلية القدس
هاتف 0096265713906 فاكس 0096265173907
www.dar-aleasar.com

ISBN 978-9957-83-311-4 (ردمك)

المحتويات

الموضوع	الصفحة

المقدمة 9

الفصل الأول
العوازل الكهربائية

مقدمة 13
المواد المستخدمة لتصنيع العوازل الكهربائية 14
تصنيف العوازل حسب التصميم 16
عوازل التعليق 19
انهيار عوازل خطوط النقل الكهربائية 27
توزيع الجهد على سلسلة العوازل المعلقة 28
كفاءة السلسلة 34
الطرق المتبعة لزيادة كفاءة سلسلة العزل 35
أمثلة محلولة 41

الفصل الثاني
انهيار العوازل الغازية

انهيار العوازل الغازية 55
المجال الكهربائي The Electric Field 56
تاين الغازات العازلة 63
ميكانيزم (آلية) تاونسند للانهيار 67
الآليات الثانوية المؤدية لزيادة التيار 68
تحديد قيم المعاملات α و γ عملياً 69
أمثلة محلولة 72
انهيار الغازات سالبة الشحنة 73

الموضوع	الصفحة

الانهيار في المجالات غير المنتظمة والتفريغ الهالي 75
غاز سادس فلوليد الكبريت (SF6) 77
انهيار العوازل السائلة 82
العوازل الصلبة 88
المواد العازلة الطبيعية 89

الفصل الثالث

الصواعق

مقدمة 113
الأسباب الطبيعية لحدوث ظاهرة الصواعق (البرق) 113
تأثيرات البرق 114
تكون الشحنات الكهربائية في السحب 115
معدل شحن السحب الرعدية 119
آلية الصاعقة الرعدية 121
النموذج الرياضي للصاعقة 126
تطبيقات على دالة خطوة الوحدة 133
أمثلة محلولة 135
حماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق 136
الحماية باستخدام أجهزة الحماية 140
العزل للمعدات والمحطات الكهربائية 146
أمثلة محلولة 150

الفصل الرابع

التاريض

مقدمة 155
أنواع نظم التاريض للتمديدات الكهربائية 156

الموضوع	الصفحة
نظم التاريض TN	157
نظام التاريض TT	159
نظام التاريض IT	160
الخصائص الفيزيائية للأرض	161
المعالجة الكيميائية للتربة	163
إلكترود التاريض	165
جهد الخطوة وجهد اللمس من محول	169
امثلة محلولة	171
الاعتبارات الفنية باستخدام قضبان التأريض	172
نظام الإلكترودات المتعددة	172
شبكة التأريض	174
قياس مقاومية الأرض	179
امثلة محلولة	180
الأسئلة	181
المراجع	195

المقدمة

في الأونة الأخيرة بات قطاع الطاقة يحظى باهتمام كبير من قبل المستهلك والمنتج على حد سواء لما له من تأثير على جميع نواحي الحياة، فقد أصبح تقدم الدول يقاس بمقدار استهلاكه من الطاقة.

وحيث أن الطاقة الكهربائية هي إحدى أنواع الطاقة، وباتت الأكثر طلباً نتيجةً لإيصال الخدمة إلى نسبة كبيرة من المستهلكين بالإضافة إلى تقدم وزيادة الإنتاج الصناعي، حيث أن ما نسبته 95٪ من القطاع الصناعي يستخدم الطاقة الكهربائية مما حتم علينا إنتاج الطاقة الكهربائية بكميات كبيرة جداً. فأصبح من الضروري إيجاد منظومات متطورة قادرة على نقل هذه الكميات الضخمة من الطاقة الكهربائية بجهود فائقة بشكل آمن. ومن الضروري أيضاً أن تكون انظمة اقتصادية وذات عمر تشغيلي طويل، وأيضاً يلبي المواصفات الفنية والشروط العامة للسلامة. وكما نعلم في علم الهندسة الكهربائية فإن مقدار الجهد يؤثر طرداً على مقدار المسافة المنقولة والكمية المنقولة أيضاً من الطاقة، والجهود الفائقة تحتاج إلى آلية عزل ووسائل عزل تضمن لنا استمرارية النقل بكفاءة وأمان، حيث يتم حالياً نقل القدرة الكهربائية في منظومات النقل إلى جهود قد تصل في بعض الأحيان إلى 1MV، ناهيك عن بعض التطبيقات المخبرية التي قد تستخدم فيها جهود تحاكي مقدار الصواعق الكهربائية مترددة ومستمرة أو نبضة قد تصل في بعض الأحيان إلى 120KV.

ومن تطبيقات تلك الاختبارات التوصل لإنتاج وتطوير عوازل مثالية ومقاومة لكل الظروف التي قد تمر بها أثناء فترة استخدامها في منظومات

نقل أو توزيع القدرة الكهربائية على حد سواء أكانت بيئية أو نتيجة مرور كميات هائلة من الطاقة.

ويتضمن الكتاب أربعة فصول، حيث أن:

- الفصل الأول: العوازل الكهربائية.
- الفصل الثاني: انهيار العوامل الغازية.
- الفصل الثالث: الصواعق.
- الفصل الرابع: التأريض.

الفصل الأول

1

العوازل الكهربائية

الفصل الأول
العوازل الكهربائية

1 – 1 المقدمة:

إن خطوط النقل والتوزيع الكهربائي يتم تثبيتها من خلال عوازل صلبة لمنع تسرب التيار الكهربائي للأرض من خلال الأبراج والأعمدة الحاملة لها، حيث يتم استخدام عوازل صلبة مصنعة من عدة مواد مختلفة، تكون ذات عازلية مرتفعة، تؤمن تشغيل ناجح وآمن وذو تكلفة مقبولة اقتصادياً في منظومات القدرة الكهربائية، ولا بد لتلك العوازل أن تلبي الشروط والمتطلبات الرئيسية للعوازل وأهمها:

1. أن تكون مصنعة من مادة غير مسامية.
2. ذات معامل تمدد حراري قليل.
3. أن تتحمل درجات حرارة عالية وتتحمل تغير درجات الحرارة.
4. مقاومة للانهيار الداخلي.
5. أن تتحمل الإجهاد الميكانيكي والشد.
6. أن تتمتع بعازلية عالية جداً.
7. متقنة الصنع بحيث تكون خالية من الشوائب أو العيوب المصنعية مثل التشقق.
8. لا تمتص السوائل ولا يمكن للغازات أن تنفذ من خلالها.

وعند إلقاء نظرة على أكثر العوامل تكراراً لانهيار عوازل الخطوط الهوائية، نجد بأن السطح الخارجي لهذه العوازل هو من أكثر المسببات لانهيار تلك العوازل. وكما ذكرنا سابقاً بأن هذا الانهيار يؤدي بدوره إلى تسرب

التيار الكهربائي من خلال هذا العازل ومسمار ربط العازل إلى جسم البرج، ومن ثم إلى الأرض، كما أن الحرارة المرتفعة جداً الناجمة عن الشرارة الكهربائية هي بدورها تؤدي أيضاً في بعض الأحيان إلى انهيار العازل.

(2 – 1) المواد المستخدمة لتصنيع العوازل الكهربائية:

إن من أقدم المواد المستخدمة في صناعة العوازل وأكثرها شيوعاً هي مادة البورسلان، التي يطلق عليها أيضاً اسم (الخزف)، ولكن في الآونة الأخيرة تم أيضاً استخدام عوازل من الزجاج الملون والأسيتايت، كما يستخدم أيضاً في بعض الحالات بعض مركبات اللدائن البتروكيميائية خاصةً في التطبيقات ذات الجهود المنخفضة. ويتم تصنيف العوازل من حيث مادة الصنع إلى:

أ. عوازل البورسلان (الخزف):

يتم صنع هذا النوع من العوازل من الصلصال المتوافر بشكل كبير في الطبيعة، حيث تم خلطها بمادة الكوارتز المتوافرة في الرمال، وتشوى في أفران على درجات حرارة مرتفعة بحيث نضمن انصهار مادة الكوارتز ليكون طبقة ناعمة وصلبة وخالية تماماً من المسامات، وبعدئذٍ يتم فحص قطع العزل كل على حدة للتأكد من عدم وجود أي فقاعات غازية داخل العازل وعدم وجود شوائب أيضاً، ولا ننسى بأنه قبل البدء بشي هذه العوازل لا بد أن تمر بمرحلة تجفيف، بحيث نضمن عدم وجود أي رطوبة متكاثفة، لأنه وكما نعلم جيداً بأن الرطوبة والغازات أو الشوائب ينشأ عنها انهيار العازل عند جهود أقل، مما يؤدي إلى ضعف الموثوقية وعدم صلاحيته في المنظومات ذات الجهد الفائق، علماً بأن عازل البورسلان يتحمل جهد لغاية 66KV/cm وقوة ضغط لغاية $75kg/cm^2$ أما الشد الميكانيكي لا يتجاوز ما مقداره $450\text{-}500kg/cm^2$

ب. العوازل الزجاجية:

في الآونة الأخيرة تم استخدام عوازل تصنع من مادة الزجاج، الذي يتم تصنيعه من خلال صهر خام الزجاج، وسكبه وتشكيله في قوالب، حيث يتم بعد ذلك تقسيته حرارياً، ليتمتع بقوة تحمل شد وضغط وإجهاد ميكانيكي أعلى. وقد انتشرت العوازل الزجاجية بشكل سريع في استخدامها في منظومات الجهد الفائق حيث أن هذا العازل يتمتع بشدة عزل تصل إلى 150KV/cm من سمك العازل.

ونذكر أيضاً من خصائص ومزايا هذا النوع:

1. ذو تكلفة بسيطة مقارنة بالمواد الأخرى المستخدمة في صناعة العوازل.
2. ذو معامل تمدد حراري منخفض.
3. شفاف اللون بحيث يسهل عملية الفحص ما بعد التصنيع، للتأكد من عدم وجود أي عيوب مصنعية مثل الفقاعات الهوائية أو الشوائب.
4. مادة متجانسة.
5. غير نافذ للهواء ولا يتأثر بالرطوبة.
6. لا يتأثر بالملوثات أو العوامل الجوية.

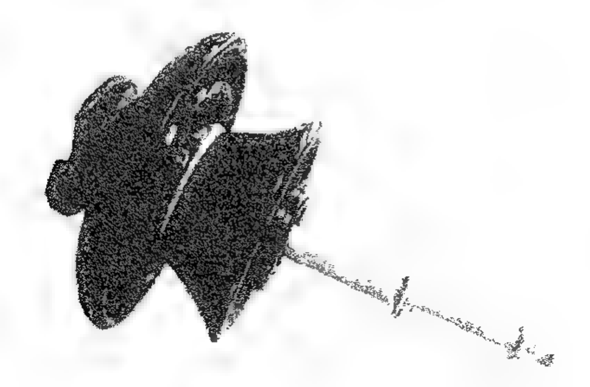
ج. عوازل الأسيتايت:

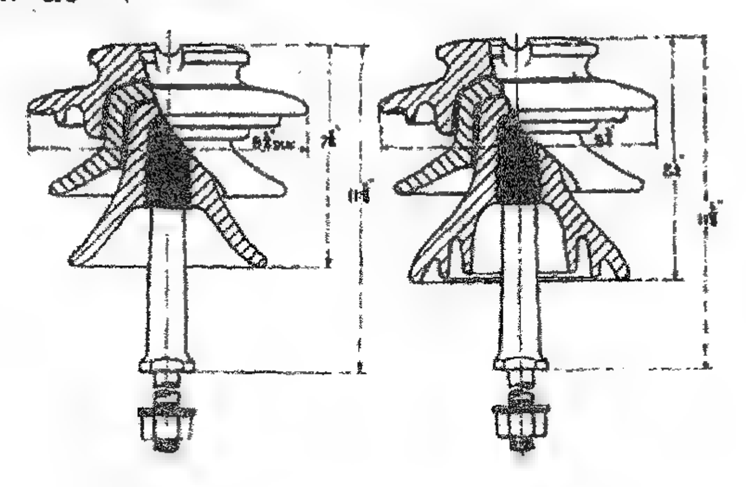
عوازل الأسيتايت هي عبارة عن مادة سيليكات الماغنيسيوم الموجودة في أوكسيد الماغنيسيوم والسيليكا، حيث تتمتع هذه المادة بتحملها لقوى الشد الميكانيكي، ويوصى باستخدامها في برج الزاوية أو في ابراج بداية ونهاية الخط لما يكون على العازل من قوى شد كبيرة.

(3 – 1) ويتم أيضاً تصنيف العوازل حسب التصميم إلى الأصناف التالية:

أ. العوازل المسمارية:

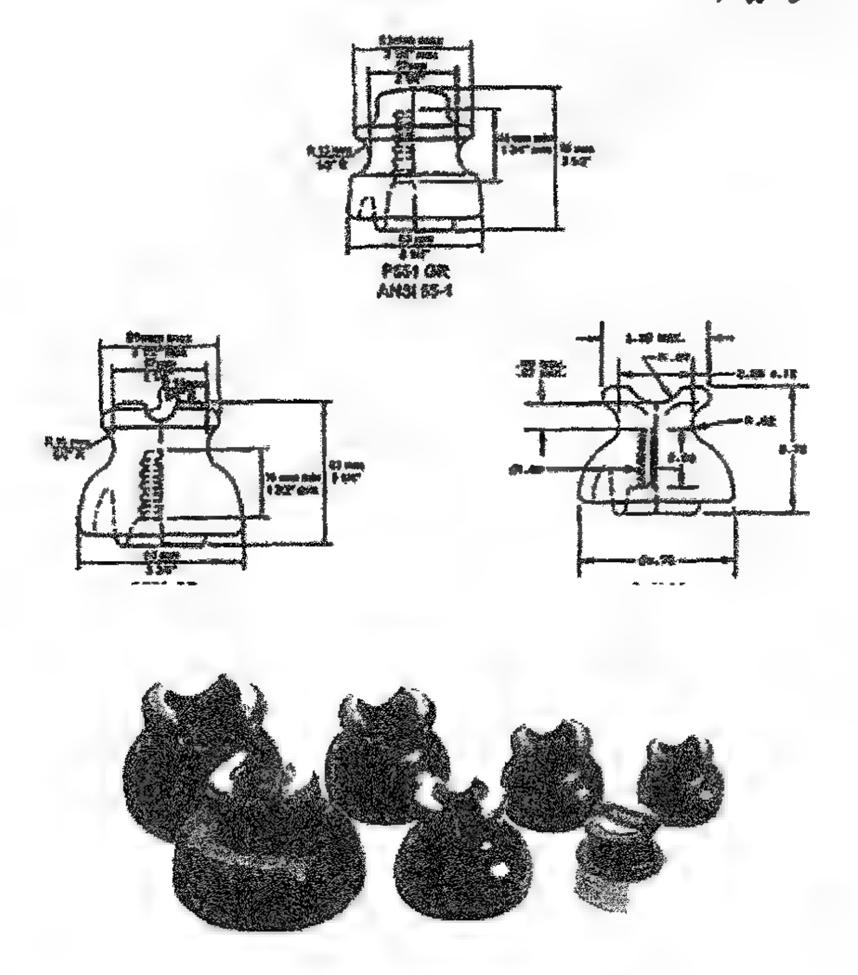
إن هذا الصنف من العوازل الهوائية من أقدم أنواع العوازل، حيث تم استخدامه من بداية القرن الماضي، ومع مرور الوقت تم إدخال بعض التعديلات على هذا الصنف من العوازل، لكنها بقيت تحضى بنفس الشكل والمظهر العام، وهذا الصنف يتم استخدامه في تثبيت خطوط التوزيع ذو الجهود المنخفضة، وتسمى بين المختصين (بالصحن)، حيث أنه مكون من طبقتين عزل تشبهان إلى حد كبير الصحن، والذي بدوره يقوم بصد الأمطار عند نقطة التثبيت لكي لا يقوم العازل بالتوصيل عندما يكون العازل مبتلاً، ويكون عدد طبقات العازل (الصحن) حسب مقدار الجهد لشكبة التوزيع، والشكل (1 – 1) يبين التصميم الهندسي والشكل العام لهذا الصنف من العوازل، حيث يبين الأبعاد الهندسية وطول مسمار الربط المستخدم لتوصيل وربط الموصل.





الشكل (1 – 1) التصميم الهندسي والشكل العام للعازل الكهربائي الصحن

أما الشكل (2 – 1) فيبين لنا المظهر العام والشكل الهندسي لعازل كهربائي يطلق عليه اسم (الفنجان). والذي هو إلى حد ما يأخذ شكل الفنجان، وهذا النوع من العوازل يستخدم في المنظومات ذات الجهود المنخفضة والتي لا تتجاوز 1KV بالحد الأعلى، وكما سبق ذكره بأن هذا الصنف تم استخدامه في بداية ظهور الطاقة الكهربائية، وهو مكون من عازل بقطعة واحدة، حيث يتم فتح سن في العازل المسماري بحيث يتم ربطه من خلال براغي تثبيت تصنع من الحديد المجلفن.



شكل (2 – 1) التصميم الهندسي والشكل العام للعازل الكهربائي الفنجان

ويمكن اتباع أكثر من طريقة لربط العازل ببراغي التثبيت وهي:

1. فتح سن خشنة وكذلك استخدام برغي بسن خشن، ويوضع ما يسمى بوردة في نهاية البرغي.
2. استخدام عازل بسن خشنة ومن ثم تبطن بمادة ناعمة والتي يتم ربط البرغي من خلالها وهي الطريقة الأكثر شيوعاً.

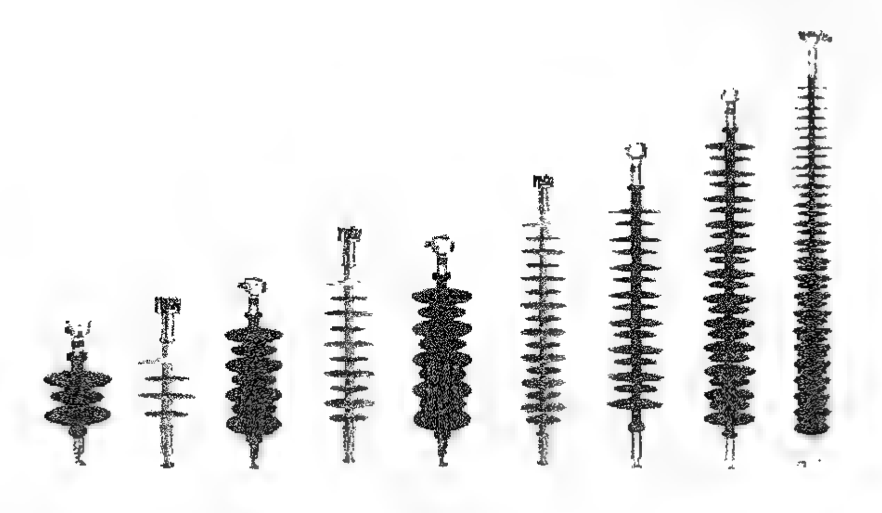
تزداد سماكة مادة العزل بارتفاع الجهد المطبق إلى أن نصل إلى سماكة معينة لا يمكن زيادتها أكثر، فيتم عندها استخدام عازل مسماري متعدد القطع وتربط ببعضها البعض، والشكل (3 – 1) يبين عازل مسماري من جزئين يستخدم للعزل لجهد 33 كيلوفولت.



الشكل (3 – 1) عازل مسماري من جزئين

(4 – 1) عوازل التعليق:

إن استخدام العازل المسماري في الجهود العالية معقداً وثقيلاً وذو تكلفة عالية، وصعب الصيانة في حال تم تلف إحدى القطع المكونة للعازل، مما يحتم علينا استخدام نوع آخر من العوازل ألا وهي عوازل التعليق، فهي عوازل يتم ربطها مع بعضها البعض من خلال قطع ربط معدنية بحيث يتم توصيل العدد اللازم من القطع على شكل سلسلة وتعلق خطوط القدرة الكهربائية في نهاية هذه السلسلة. كما هو موضح في الشكل (4 – 1).



الشكل (4 – 1)

ويتميز هذا النوع من العوازل بعدد من المميزات، وهي:

1. يمكن استبدال وحدة العزل بسهولة وبتكلفة بسيطة.
2. إن هذا النوع من العزل يجعل مسافة كافية بين كوابل خط النقل الكهربائي وجسم البرج، مما يعود بالنفع حين وقوع الصاعقة التي تصل إلى جسم البرج المؤرض قبل الخط.
3. في حال تم استخدام خطوط ثنائية او ثلاثية الأسلاك لا تزيد تكلفة العزل.
4. يتم إنتاجها من قبل المصنع بحيث كل وحدة عزل تتحمل جهد مقداره 11 كيلو فولت، فبذلك يتم ربط عدد من وحدات العزل حسب الجهد المطبق.
5. إن مدونة حركة العزل وتأرجحه الناجمة عن قوة الرياح تقلل وبنسب كبيرة من الإجهادات الميكانيكية، وتكون في هذه الحالة تقع تحت قوى الشد الناجمة عن وزن الموصل.

ويتم إنتاج ثلاثة انواع من عوازل التعليق هي:

1) النوع المنحوت:

وقد ظهر هذا النوع في بداية ظهور عوازل البورسلان، ويكون على شكل اقراص. ويتكون الجزء المركزي العلوي للعازل من نفقين منحنيين ومستوى النفقين متعامدين على بعضهما، ويمر الرابط على شكل حرف U من الرصاص المغطى بالصلب داخل النفقين ويربط أسفل الوحدة الأولى من العازل مع الوحدة التي تليها وهكذا.

ويتميز هذا النوع من العوازل بما يلي:

1. عند حدوث كسر في العازل فإن الموصلات تبقى معلقة ولا تسقط.
2. بساطتها.
3. البورسلان بين النفقين تحت قوة ضغط فقط. وتوفر شدة ميكانيكية للعازل.

وكما هو الحال في بقية أصناف العوازل فإن لهذا العازل عيب هو أن مادة البورسلان الواقعة بين الروابط تكون تحت تأثير إجهاد الكتروستاتيكي شديد مما قد يؤدي إلى انهيار العازل.

2) النوع ذو الغطاء الإسمنتي:

إن هذا النوع من العوازل يتكون من أقراص (صحون) من مادة البورسلان، والتي تكون مجوفة من الأسفل لزيادة مسافة الانهيار السطحي للعازل، ويتم وضع غطاء على الجهة العلوية من قرص العازل، من الحديد الزهر المملوء بالإسمنت، ويتم وضع برغي تثبيت من الصلب المجلفن في تجاويف العازل حيث يثبت في تجويف غطاء الصلب للعازل الذي يليه.

ومن أهم عيوب مثل هذا النوع من العوازل بأن عامل التمدد الحراري للمواد الثلاثة المستخدمة في هذا العازل مختلفة كثيراً، مما يؤدي في بعض الأحيان إلى انهيارها عند درجات حرارة مرتفعة.

والشكل (5 – 1) يبين لنا عازل تعليق لخطوط النقل الكهربائي.



الشكل (1 – 4) عازل تعليق خطوط النقل الكهربائي

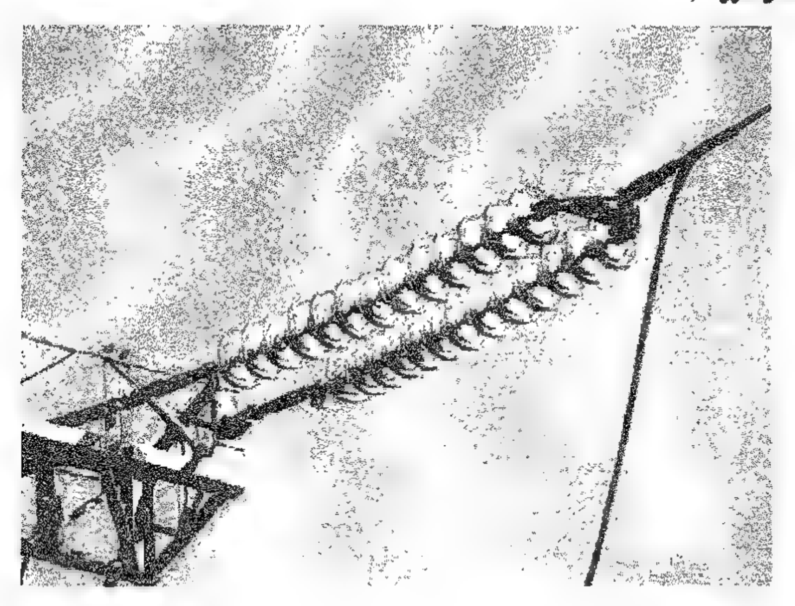
3) العوازل ذات وصلات الربط:

وهذا النوع من العوازل هو عبارة عن مزيج من النوعين السابقين، حيث أنه يتميز بمميزات كل من النوعين السابقين، وتصنع الروابط في هذا النوع من العوازل كاسطوانات معدنية مضغوطة يتم ربطها على عازل البورسلان بحيث أن كل قرص عازل يوضع متماثلاً بما يتطابق مع الخطوط الالكتروستاتيكية. وبهذه الطريقة يتم تجنب الإجهادات الميكانيكية العالية، ويمكننا استخدام عوازل بالسمك المناسب والذي يسمح للعازل بأن يتكون من قرص واحد، وله أيضاً ميزة أخرى هي توفير شدة عزل عالية.

ويتم تصنيف عوازل التعليق من حيث الاستخدام إلى:

1. عوازل الإجهاد:

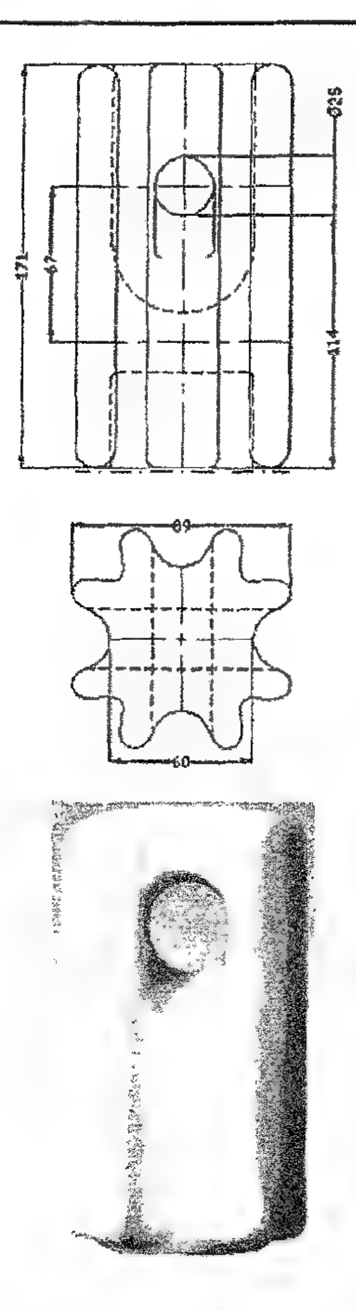
وهي العوازل المستخدمة في أبراج بداية ونهاية الخط، وما يسمى ببرج الزاوية، حيث انه في هذه الحالات يتعرض الخط لإجهادات ميكانيكية كبيرة جداً، مما يتحتم علينا استخدام عوازل ذات خطين متوازيين ومرتبطين مع بعضهما البعض بحيث يتم توزيع قوى الإجهاد الميكانيكي على خطين أو أكثر، أما في الخطوط ذات الجهود المنخفضة في مثل هذه الحالة يتم استخدام ما يسمى بعوازل البكرة، والشكل $(6-1)$ يبين هذا النوع من العوازل.



الشكل (6 – 1) عوازل الإجهاد لخطوط النقل الكهربائي

ب. عوازل الدعم:

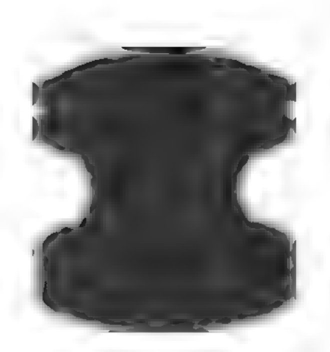
إن الأعمدة المستخدمة في منظومات التوزيع ذات الجهود المنخفضة تشد من خلال أسلاك شد إلى الأرض، وعوازل الدعم هي العوازل التي يتم ربط سلك الشد، وفي معظم الأحيان تكون مصنوعة من البورسلان ويصمم بحيث أنه عند انهيار العازل لا يسقط سلك التثبيت إلى الأرض، والشكل (7 – 1) يبين لنا عوازل الدعم.

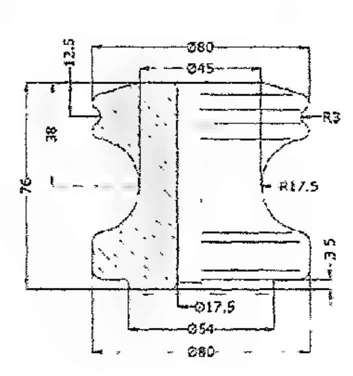


الشكل (7 – 1) عوازل الدعم لخطوط النقل الكهربائي

ج. عوازل البكرة:

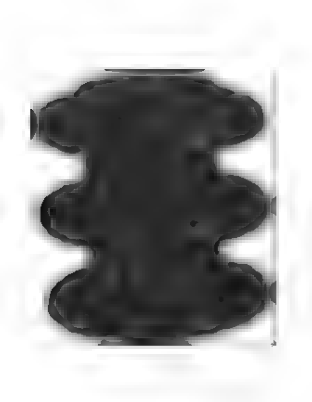
وهي عوازل تستخدم في خطوط التوزيع الكهربائية ذات جهود منخفضة، ويمكن استخدام هذا النوع من العوازل في الوضعين الأفقي أو العامودي، حيث يتم استخدام موصل مرن وذو قطر بسيط. والشكل (8 – 1) يبين لنا المنظر العام والشكل الهندسي لعازل البكرة من الطبقة الواحدة.

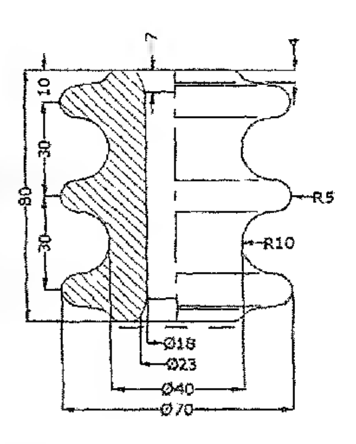




الشكل (8 – 1) عوازل البكرة من طبقة واحدة لخطوط النقل الكهربائي

أما الشكل (9 – 1) فيبين لنا المنظر العام والشكل الهندسي لعوازل البكرة من طبقتين.





الشكل (9 – 1) عوازل البكرة من طبقتين لخطوط النقل الكهربائي

ولا ننسى أن هذا النوع من عوازل البورسلان لم يتم استبداله بالعوازل الزجاجية لغاية هذه اللحظة.

(5 – 1) انهيار عوازل خطوط النقل الكهربائية:

إن انهيار عوازل خطوط النقل الكهربائية من أكثر ما يقلق القائمين على منظومات نقل القدرة الكهربائية، لأنها من الأعطال التي تكلف الكثير من الوقت في معالجتها، لذا عند القيام بتصميم منظومات القدرة الكهربائية خاصة خطوط الجهد العالي يراعى إضافة نسبة مئوية إضافية تحسباً من أي تغير مفاجئ قد يطرأ على أحد عناصر هذه المنظومة.

وتعود أسباب انهيار العوازل إلى:

1. كسر العازل:

إن الإجهادات الميكانيكية وقوى الشد ومعامل التمدد الحراري المختلف للمواد المكونة للعازل نتيجة اختلاف درجات الحرارة، لتغير الفصول الأربعة وارتفاع درجة حرارة الموصل في بعض الأحيان الناجم عن الحمل الزائد يؤدي إلى كسر العازل البورسلان، الذي تم إدخال تحسينات كثيرة عليه، بحيث تم وضع وسادة بين الطبقات وبرغي التثبيت الصلب للسماح بالتمدد لكل مكون من مكونات العازل.

2. العيوب المصنعية في مادة العازل:

وكما نعلم عند وجود أي عيب مصنعي بمادة العازل مثل الشوائب أو الفراغات أو الفقاعات الهوائية بأي مكان من هذا العازل، فإنه من المؤكد سيؤدي إلى كسر هذا العازل.

3. الإجهاد الميكانيكي:

عند تصميم منظومة نقل وتوزيع القوى الكهربائية يتم حساب الإجهادات الميكانيكة وقوى الشد الواقع على العازل بشكل دقيق، إلا أنه في بعض الأحيان نتيجةً لعيب مصنعي غير مرئي يؤدي إلى كسر هذا العازل، ولا ننسى بأن مادة البورسلان مادة غير شفافة مما يصعب علينا فحص الجدران الداخلية للعازل.

4. خشونة السطح:

عند إنتاج العازل فإن عدم صقله بالشكل الكافي سوف يؤدي إلى احتفاظ هذه التجاويف الدقيقة بكمية من الماء على سطح العازل، نتيجة الأمطار أو الندى، ومع وجود ذرات الغبار في الهواء المحيط بها يؤدي ذلك إلى تكون الطين، مما يشكل مناطق موصلة كهربائياً تتسبب بانهيار العازل وتسرب التيار الكهربائي إلى جسم البرج المؤرض.

5. مسامية مادة العزل:

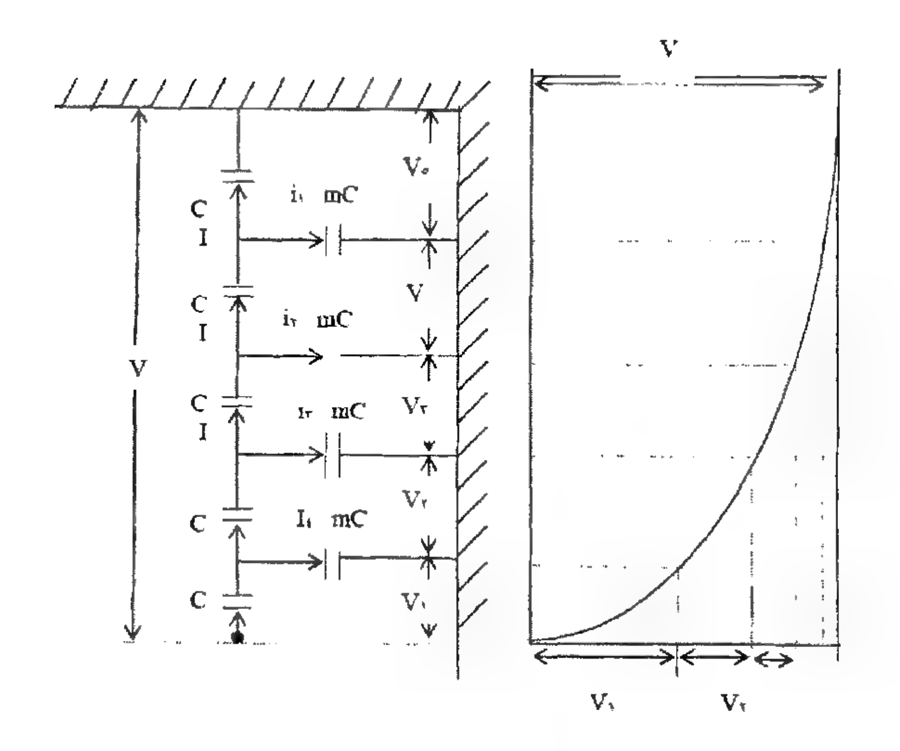
يجب الحرص على الا تكون مادة العزل مسامية حتى لا تمتص الرطوبة من الهواء المحيط، لأنها بذلك تقل شدة عزل مادة البورسلان، ويبدأ تيار التسريب في الظهور من خلال العازل مما قد يؤدي إلى انهيار العازل.

(6 – 1) توزيع الجهد على سلسلة العوازل المعلقة:

إن انحصار مادة البورسلان بين معدني الربط في العوازل المعلقة تكون مكثف ذو سعة C فاراد، ونسمي هذه السعة بالسعة المتبادلة، وبالإضافة لهذه السعة هناك سعة أخرى بين كل معدن ربط وذراع البرج المعدني، فعند

افتراض وجود سلسلة عوازل معلقة تحتوي على عدة وحدات عزل يكون الهواء هو العازل بين معدن ربط هذه السلسلة، وهنالك أيضاً سعة بين معدن الربط والخط المستخدم لنقل القدرة الكهربائية، ولكنها ذات قيم صغيرة جداً بحيث يمكن إهمالها وعدم أخذها بعين الاعتبار.

فلو افترضنا بأن هناك برج نقل يحتوي على سلسلة عوازل معلقة مكونة من خمس وحدات عزل فإنها سوف تكون بالشكل التالي:



الشكل (10 – 1) توزيع الجهود على وحدات سلسلة العوازل

ففي الشكل (10 – 1) يتم توزيع الجهود على وحدات سلسلة العوازل، حيث أن الجهد يقسم على وحدات العزل حسب عددها.

بفرض أن: m = (السعة للأرض/ السعة المتبادلة) .... (1)

فإن: m = (السعة للأرض/ C)

السعة للأرض = mC فاراد .... (2)

مفاعلة المكثف التبادلي = (1/wC) .... (3)

مفاعلة المكثف للأرض = (1/wmC) ...... (4)

ونفترض أن الجهد الكهربائي المطبق على وحدة العازل العلوي هو V_1 فإن شدة التيارين I_1، i_1 سوف يكونان:

$$I_1 = [V_1/ (1/ wC)] = V_1wC \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (5)$$

$$i_1 = [V_1/ (1/ wC)] = V_1wC \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (6)$$

$$I_2 = I_1 + i_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (7)$$

وبالتعويض عن قيمتي I_1 وi_1 من المعادلتين (5) و(6) في المعادلة (7):

$$I_2 = V_1wC + mV_1wC = V_1wC\ (1 + m) \quad \ldots\ldots\ldots\ (8)$$

$$V_2 = I_2/ wC \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (9)$$

في ضوء المعادلتين (8) و(9) فإن:

$$V_2 = V_1wC\ (1 + m)/ wC = V_1(1 + m) \quad \ldots\ldots\ldots\ (10)$$

$$i_2 = (V_1 + V_2)/ 1/ wmC) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (11)$$

بالتعويض من المعادلة (10) في المعادلة (11) فإن:

$$i_2 = m[V_1 + (1 + m)]wC = mV_1wC\ (2 + m) \quad (12)$$

$$I_3 = I_2 + i_2 \quad (13)$$

$$I_3 = V_1wC(1+m) + mV_1wC(2+m) = V_1wC(1+3m+m^2) \quad (14)$$

$$V_3 = I_3/\ wC \quad (15)$$

وفي ضوء المعادلتين (14) و(15) فإن:

$$V_3 = V_1(1 + 3m + m^2) \quad (16)$$

$$I_3 = (V_1 + V_2 + V_3)/\ (1/\ wmC) \quad (17)$$

وفي ضوء المعادلتين (10) و(16) يمكن إعادة كتابة المعادلة (17) كما يلي:

$$i_3 = m(V_1 + V_2 + V_3)wC$$

$$= m[V_1 + (1 + m)V_1 + (1 + 3m + m^2)V_1]wC$$

$$= mV_1wC(3 + 4m + m^2) \quad (18)$$

$$I_4 = I_3 + i_3 \quad (19)$$

بالتعويض في المعادلتين (14) و (18) في المعادلة (19):

$$I_4 = V_1wC(1 + 3m + m^2) + mV_1wC(3 + 4m + m^2)$$

$$= V_1wC(1 + 6m + 5m^2 + m^3) \quad (20)$$

$$V_4 = I_4/\ wC \quad (21)$$

وفي ضوء المعادلتين (20) و(21) فإن:

$$V_4 = V_1(1 + 6m + 5m^2 + m^3) \quad (22)$$

$$i_4 = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)/ (1/ wmC) \quad (23)$$

في ضوء المعادلتين (10) و(16) و(22) يمكن إعادة كتابة المعادلة (23) كما يلي:

$$i_4=m[V_1+(1+m)V_1+(1+3m+m^2)V_1+(1+6m+5m^2 +m^3)V_1]wC$$

$$= mV_1wC(4 + 10m + 6m^2 + m^3) \quad (24)$$

$$I_5 = I_4 + i_4 \quad (25)$$

بالتعويض من المعادلتين (20) و(24) في المعادلة (25):

$$I_5 = V_1wC(1 + 6m + 5m^2 + m^3) + mV_1wC(4 +10m + 6m^2 + m^3)$$

$$= V_1wC(1 + 10m + 15m^2 + 7m^3 + m^4) \quad (26)$$

$$= V_5 = I_5/ wC \quad (27)$$

وفي ضوء المعادلتين (26) و(27):

$$V_5 = V_1(1 + 10m + 15m^2 + 7m^3 + m^4) \quad (28)$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 \quad (29)$$

بالتعويض من المعادلات (10) و(16) و(22) و(28) في المعادلة (29):

$$V = V_1 + (1+m)V_1 + (1+3m+m^2)V_1 + (1+6m+5m^2+m^3)V_1$$
$$+ (1+10m+15m^2+7m^3+m^4)V_1$$

$$\therefore V = V_1(5 + 20m + 21m^2 + 8m^3 + m^4) \;\ldots\ldots\ldots\ldots\; (30)$$

مثال: بافتراض أن السعة للأرض تساوي 0.1، من المعادلة (30) فإن الجهد:

$$V = V_1(5 + 2 + 0.21 + 0.008 + 0.0001) \approx 7.218V_1$$

$$\therefore V_1 = 0.1386V$$

من المعادلة (10):

$$V_2 = V_1(1 + m)$$
$$= 0.1386 \times (1 + 0.1)$$
$$= 0.1368 \times 1.1V$$
$$= 0.15246$$

من المعادلة (16):

$$V_3 = V_1(1 + 3m + m^2)$$
$$= V_1(1 + 0.3 + 0.01)$$
$$= 0.1386 \times 1.31V = 0.1815V$$

من المعادلة (22):

$$V_4 = V_1(1 + 6m + 5m^2 + m^3)$$
$$= V_1(1 + 0.6 + 0.05 + 0.001)$$
$$= 0.1386 \times 1.651V = 0.2288V$$

من المعادلة (27):

$$V_5 = V_1(1 + 10m + 15m^2 + 7m^3 + m^4)$$
$$= V_1(1 + 1 + 0.15 + 0.007 + 0.0001)$$
$$= 0.1386 \times 2.1571 = 0.2987V$$

(1 – 7) كفاءة السلسلة:

إن وحدة العزل الأقرب (المجاورة) لخط نقل القدرة الكهربائية يقع عليها أكبر جهد كهربائي فهي معرضة للإجهاد الكهربائي العالي، مما يزيد من مدى احتمالية انهيارها أكثر من باقي السلسلة، وبالتالي فإن كفاءة السلسلة هي: النسبة بين الجهد الكلي الواقع على السلسلة وعدد الوحدات (n) مضروب في مقدار الجهد الواقع على الوحدة الأولى المجاورة تماماً لخط النقل الكهربائي.

ويمكن التعبير عن كفاءة السلسلة كالتالي:

كفاءة السلسلة = (الجهد الواقع على السلسلة)/n × مقدار الجهد الواقع على وحدة العازل المجاورة للموصل الكهربائي

(8 – 1) الطرق المتبعة لزيادة كفاءة سلسلة العزل:

يتم دائماً البحث عن أية طريقة يمكننا من خلالها زيادة كفاءة العزل، والطرق المستخدمة لزيادة كفاءة العمل هي:

1. تقليل قيمة السعة للأرض:

نلاحظ من خلال المعادلات (10، 16، 22، 28) بأنه باقتراب قيمة السعة للأرض إلى الصفر فإن الجهد على وحدات العازل تتساوى تقريباً، لذلك لكي نقلل من قيمة m نقوم بزيادة مسافة ذراع البرج لكي نوجد فراغ أكبر بين سلسلة العوازل وجسم البرج المعدني، ولكن لا يمكننا زيادة طول ذراع البرج إلى قيم كبيرة جداً، فلهذا تعتبر هذه الطريقة من الطرق الغير عملية.

2. تدرج سلسلة العوازل:

من خلال التدرج بقيم السعة التبادلية، بحيث نستخدم في سلسلة العوازل وحدة العزل العليا بحيث يكون لها أقل سعة، والسعة التبادلية للوحدة السفلى لها أكبر سعة، فيمكن بالتالي من أن تتساوى الجهود على وحدات السلسلة.

وبافتراض أن C هي سعة الوحدة العليا، وأن الوحدات الأخرى لها سعات كالتالي C_2 , C_3 , C_4.

m: (السعة للأرض/ سعة الوحدة العليا)

mC: السعة للأرض

نفترض بأن V' هو الجهد الموجود على كل وحدة من وحدات التسلسل.

$I_1 = V'wC$ .... (32)

$i_1 = mV'wC$ .... (33)

ومن خلال المعادلات (32، 33، 34) يمكن كتابة المعادلة كالتالي:

$I_2 = V'wC + mV'wC$

$= V'wC(1 + m)$ .... (35)

ويفرض أن مقدار الجهد المطبق على V' فإن:

$V' = I_2/ wC_2$ .... (36)

ومن خلال (35، 36) نجد أن:

$V' = V'wC(1 + m)/ wC_2$ .... (37)

$C_2 = C(1 + m)$ .... (38) أو

$i_2 = 2V_1/ (1/ mwC)$

$= m(2)V'wC$ .... (39)

$I_3 = I_2 + i_2$ .... (40)

من المعادلات (35) و(39) و(40) نستطيع إيجاد:

$I_3 = V'wC(1 + m) + m(2)V'wC$

$= V'wC(1 + m + 2m)$ .... (41)

$V` = I_3/ wC_3$ .... (42)

ومن خلال التعويض عند قيمة I_3 من المعادلة (41) في المعادلة (42) فإن:

$V` = V`wC(1 + 3m)/ wC_2$

$C_3 = C(1 + 3m)$ .... (43)

$i_3 = 3V`/ (1/ mwC)$

$= m(3)V`wC$ .... (44)

$I_4 = I_3 + i_3$ .... (45)

ومن المعادلتين (41) و(44) نستطيع أن نجد:

$I_4 = V`wC(1 + 3m) + m(3)V`wC$

$= V`wC(1 + 6m)$ .... (46)

$V` = I_4/ wC_4$ .... (47)

وعند التعويض بقيمة I_4 من المعادلة (46) في المعادلة (47) نحصل على:

$V` = V`wC(1 + 6m)/ wC_4$

$C_4 = C(1 + 6m)$ .... (48)

فمن خلال ما سبق نجد بأنه من المحتمل مساواة الجهود الواقعة على وحدات سلسلة العوازل لو أن سعات هذه الوحدات متناسبة كالتالي:

$1: (1 + m) : (1 + 3m) : (1 + 6m)$ ...

ولكن من الناحية العملية هنالك صعوبة كبيرة جداً للحصول على وحدات عزل لها سعات بهذه النسبة، ولذا يتم في الواقع استخدام وحدات عزل قياسية. ويتم ربط أكبر وحدة عزل في جهة خط نقل القدرة الكهربائية.

3. استخدام حلقة الحماية:

حلقة الحماية هي عبارة عن حلقة معدنية لها قطر كبير وتوصل بخط النقل الكهربائي وتحيط بالوحدة السفلي من سلسلة العزل. وذلك لمساواة الجهد الواقع على وحدات العزل، حيث أن هذه الحلقة تزيد سعة المكثفات بين الروابط المعدنية والخط الكهربائي، وإذا افترضنا استخدام سلسلة عزل مكونة من أربع وحدات عزل بحيث C هي سعة كل وحدة، والسعة بين الروابط المعدنية والحلقة هي C_1، C_2، C_3، بفرض أن (V) الجهد الواقع على كل وحدة من وحدات السلسلة، وبما أن سعات وحدات السلسلة متساوية فسوف يكون تيار الشحن I أيضاً متساوياً. والشكل $(11 - 1)$ يبين استخدام حلقة الحماية لمساواة الجهود على وحدات السلسلة العازلة.

الشكل (11– 1) استخدام حلقة الحماية

إن تيار الشحن للوحدة رقم (2) يساوي I عند نقطة التفريغ الأولى وبالتالي فإن:

$$I = I + i_1 - I_1 \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \; (49)$$

$$\therefore\; i_1 = I_1 \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \; (50)$$

$i_2 = I_2$ .... (51)

$i_3 = I_3$ .... (52)

$= mVwC$

الجهد الذي يتسبب في مرور التيار I_1 هو $3V$ الواقع على الوحدة الأولى.

أيضاً فإن:

$I_1 = 3V(1/ wC_1)$ .... (54)

$= 3VwC_1$

لذلك فإنه في ضوء المعادلات (50)، (53)، (54):

$3VwC_1 = mVwC$

او $C_1 = mC/3$ .... (55)

$I_2 = 2V(1/wC_2) = 2VwC_2$ .... (56)

$I_2 = 2V(1/ wmC) = 2mVwC$ .... (57)

ومن خلال المعادلات (51)، (56)، (57) فإن:

$2VwC_2 = 2mVwC$

$C_2 = mC$ .... (58)

$I_3 = V/ (1/ wC_3) = VwC_3$ .... (59)

$I_3 = 3V/ (1/ wmC) = 3mVwC$ .... (60)

وفي ضوء المعادلات (52)، (59)، (60) فإن:

$$VwC_3 = 3mwC$$

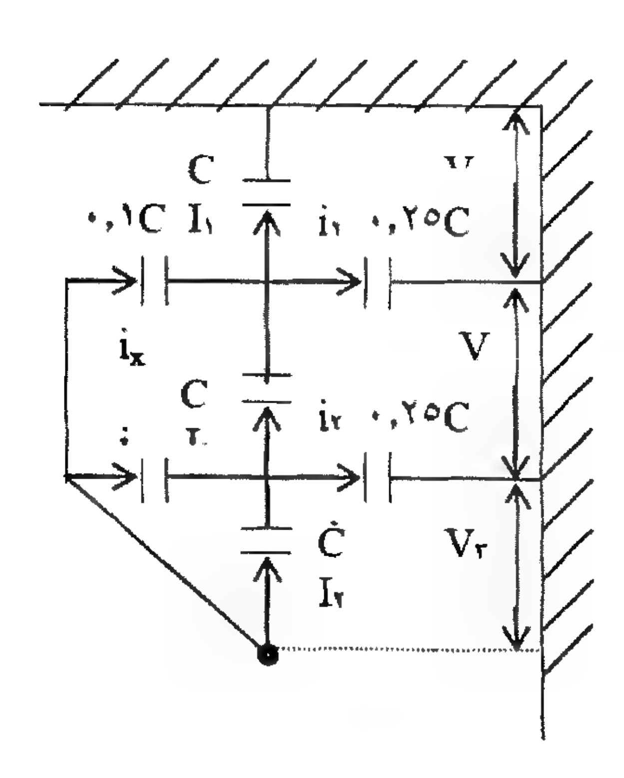
$$C_3 = 3mC \ldots\ldots\ldots\ldots (61)$$

(9 – 1) أمثلة محلولة:

مثال (1): سلسلة من العوازل مكونة من 3 وحدات احسب:

أ. الجهد على كل وحدة منسوباً إلى جهد الوجه للخط الكهربائي.

ب. كفاءة السلسلة.



الحل:

$I_1 = V_1 wC$

$i_1 = 0.25V_1 wC$

$i_x = 0.1(V_2 + V_3)wC$

أيضاً:

$I_2 = V_2 wC$

$i_2 = 0.25(V_1 + V_2)wC$

$i_y = 0.1V_3 wC$

$I_3 = V_3 wC$

وبتطبيق قانون كيرشوف عند النقطة A فإن:

$I_2 + i_x = I_1 + i_1$

أو $I_2 = 0.1wC(V_2 + V_3) = V_1 wC + 0.25V_1 wC$

أو $V_2 wC + 0.1wC(V_2 + V_3) = V_1 wC + 0.25V_1 wC$

$V_2 + 0.1V_2 + 0.1V_3 = 1.25V_1$

أو $1.25V_1 - 1.1V_2 - 0.1V_3 = 0 \;\ldots\ldots\ldots\; (62)$

وبتطبيق قانون كيرشوف عند النقطة B فإن:

$$I_3 + i_y = I_2 + i_2$$

$$V_3wC + 0.1V_3wC = V_2wC + 0.25(V_1 + V_2)wC$$

$$\therefore 1.1V_3 = 0.25V_1 + 1.25V_2$$

$$\therefore 0.25V_1 + 1.25V_2 - 1.1V_3 = 0 \text{ .... } (63)$$

بضرب المعادلة (62) في 11:

$$13.75V_1 - 12.1V_2 - 1.1V_3 = 0 \text{ .... } (64)$$

بطرح المعادلة (64) من المعادلة (63) نجد أن:

$$13.5V_1 - 31.35V_2 = 0$$

$$\therefore V_1 = 31.35V_2/ 13.5 = 0.988V_2$$

بضرب المعادلة (63) في 5:

$$1.25V_1 + 6.25V_2 - 5.5V_3 = 0 \text{ .... } (65)$$

بطرح المعادلة (65) من المعادلة (62) نجد أن:

$$- 7.35V_2 + 5.4V_3 = 0$$

$$\therefore V_3 = 7.35V_2/ 5.4 = 1.362V_2$$

لكن:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$= 0.988V_2 + V_2 + 1.362V_2$$

$$= 3.35V_2$$

$\therefore V_2 = 0.2985V$ أو

$$\therefore V_1 = 0.2985 \times 0.988V = 0.295V$$

$$\therefore V_3 = 1.362 \times 0.2985V = 0.4065V$$

لذلك فإن:

$V_1 = 29.5\%$

$V_2 = 29.85\%$

$V_3 = 40.65\%$

كفاءة السلسلة = η حيث أن:

η = جهد الوجه للخط/ (عدد وحدات العازل × فرق الجهد على العازل المجاور للخط الكهربائي)

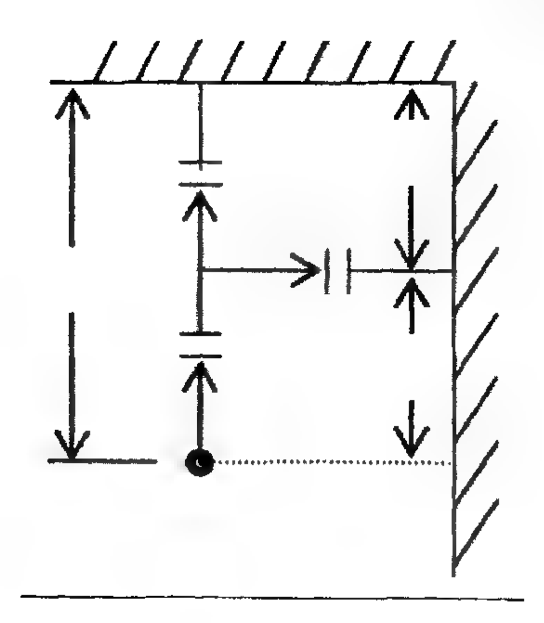
$$\eta = (V/ (3 \times 0.4065V)) \times 100 = 100/ 1.2195 = 82.1\%$$

$$\eta = 82.1\%$$

مثال (2): أوجد اقصى جهد تتحملها سلسلة عوازل، إذا كان أقصى جهد لكل وحدة من السلسلة لا يزيد عن 17KV، وكانت السعة بين كل وصلة معدنية والأرض 20٪ من السعة الذاتية للعازل. إذا كانت السلسلة مكونة من:

أ. وحدتي عزل.

ب. ثلاث وحدات عزل.



الحل:

أ.

$m = 20\% = 0.2$

$I_1 = V_1/ (1/wC) = V_1wC$

$i_1 = V_1/ (1/ wmC) = mV_1wC$

$i_2 = I_1 + i_1$

$= V_1wC + mV_1wC$

$= V_1wC(1 + m)$

$V_2 = I_2/ wC = V_1wC(1 + m)/ wC$

$= V_1(1 + m)$

بفرض ان V هي اقصى جهد للخط الكهربائي:

$\therefore V = V_1 + V_2$

$= V_1 + V_1(1 + m)$

$= V_1 (2 + m)$

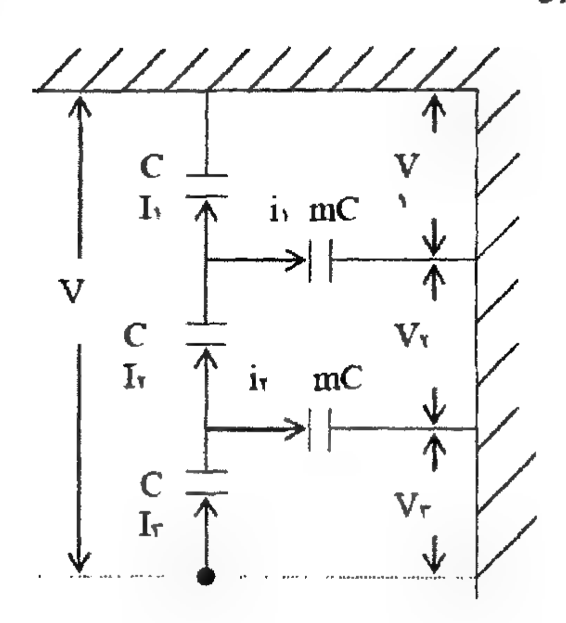
$V_1 = V/(2 + m) = V/(2 + 0.2) = 0.4545V$

لذلك فإن اقصى جهد للعازل V_2 هو 17KV

$\therefore 0.4545V = 17$

$\therefore V = 17/0.4545 = 31.16$ KN

ب. كما سبق:



$V_2 = V_1(1 + m)$

$i_2 = (V + V_2)/ (1/wmC)$

$= m[V_1 + V_1(1 + m)]wC$

$= mV_1wC(2 + m)$

$I_3 = I_2 + i_2$

$= V_1wC(1 + m) + mV_1wC(2 + m)$

$= V_1wC(1 + 3m + m^2)$

$V_3 = I_3/wC$

$= V_1(1 + 3m + m^2)$

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$= V_1 + V_1(1 + m) + V_1(1 + 3m + m^2)$$

$$= V_1(3 + 4m + m^2)$$

$$= V_1(3 + 4 \times 0.2 + 0.2^2)$$

$$= 3.84\ V_1$$

أو $V_1 = V/ 3.84 = 0.2604V$

إذاً أقصى قيمة للجهد:

$$V_3 = V_1(1 + 3m + m^2)$$

$$= 0.2604V(1 + 3 \times 0.2 + 0.2^2)$$

$$= 0.427V$$

لكن $V_3 = 17\ KV$

$$\therefore V = 17/ 0.427 = 398\ KV$$

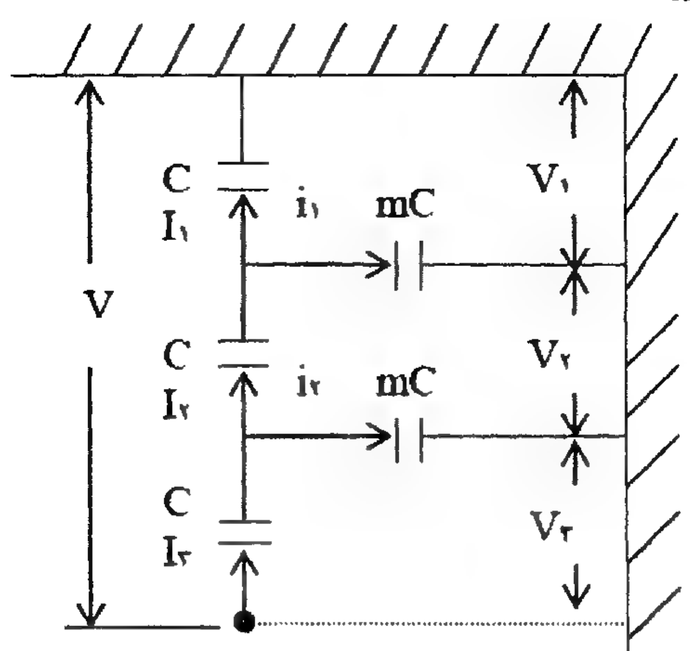
مثال (3): خط نقل ثلاثي الأطوار مثبت بواسطة عوازل تحتوي على ثلاث وحدات عازل. الجهد على العازل الأول والثاني هو 8KV، 11KV على التوالي.

احسب:

أ. النسبة بين السعة بين الرابط المعدني والأرض إلى السعة الذاتية للعازل.
ب. جهد الخط.
ج. كفاءة السلسلة.

الحل:

ا. يفترض أن C هي السعة الذاتية لكل وحدة من العازل وmC هي السعة بين الرابط المعدني للعوازل والأرض.



$V_2 = (1 + m)V_1$

$11 = (1 + m)(8)$

$(1 + m) = 11/8 = 1.375$

$\therefore m = 0.375$

ب.

$V_3 = (1 + 3m + m^2)V_1$

$= (1 + 1.125 + 0.14) \times 8$

$= 18.12 \text{ KV}$

جهد الطور هو V

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$= 8 + 11 + 18.12$$

$$= 37.12\ KV$$

جهد الخط = $\sqrt{3}$ × جهد الطور

$= 37.12 \times \sqrt{3}$

$= 64.28\ KV$

ج. كفاءة السلسلة η:

$$\eta = [V/ 3 \times V_2] \times 100$$

$$= 37.12/ (3 \times 18.12)] \times 100$$

$$= 68.28\%$$

الفصل الثاني

2

انهيار العوازل الغازية

الفصل الثاني

انهيار العوازل الغازية

(1 – 2) انهيار العوازل الغازية:

يعتبر الهواء من أهم العوازل الغازية المستخدمة في تطبيقات الجهد العالي، وذلك لوجوده حول موصلات منظومات نقل القدرة الهوائية والعديد من التوصيلات الكهربائية، حيث أنه يحيط بكل عنصر من عناصر منظومات النقل والتوزيع وبجميع مكونات محطات التوليد والتحويل، إلا انه وفي بعض الأحيان يتم استخدام غازات أخرى، وذلك بسبب وجود بعض المعدات الكهربائية المستخدمة في تطبيقات الجهود المرتفعة والفائقة. مثل غاز سادس فلوريد الكبريت، النيتروجين، الفريون وثاني أكسيد الكربون بنسب قليلة. وعند تطبيق جهد كهربائي في هذه الموصلات، يسري تيار صغير جداً بين الأقطاب الكهربائية المعزولة بالغاز، وفي هذا الوقت تحدث مختلف الظواهر داخل العوازل الغازية، وعند فصل المصدر يستعيد الغاز العازل خصائصه الكهربائية.

وبازدياد الجهد المطبق على الموصل تزداد شدة المجال الكهربائي $E=V/D \quad KV/cm^2$ إلى ان يحدث التأين وعندئذٍ يزداد التيار الساري بين الأقطاب، وعند وصول التيار إلى القطب الآخر يكون قد حدث الانهيار الكهربائي، وعندئذٍ تنتج شرارة موصلة قوية بين الأقطاب، ويسمى أقصى جهد يفقد العازل بعده خاصية العزل بجهد الانهيار للغازل العازل.

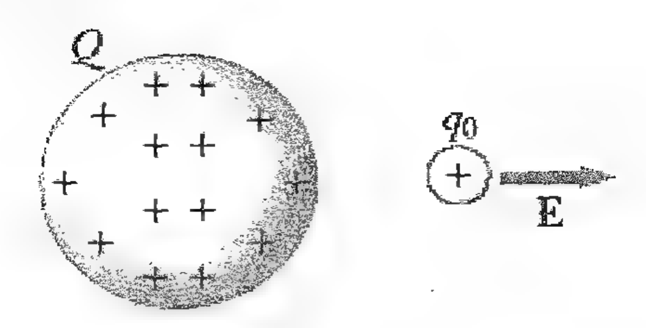
(2 – 2) المجال الكهربائي The Electric Field:

يصاحب أي جسم مشحون مجال كهربي يحيط به ويؤثر على أي شحنة تقع داخل حيز هذا المجال بقوة تنافر أو تجاذب حسب نوع هذه الشحنة (موجبة أو سالبة). وهذا يشبه مجال الجاذبية الأرضية للأرض، حيث تجذب الأرض إليها الأجسام طالما لم يخرج من نطاق الجاذبية الأرضية. وكذلك على مجال المصدر الحراري الذي يؤثر على الأجسام الموجودة فيه، ويشعرها بالدفء والحرارة. ويمكن الكشف عن وجود مجال كهربائي عند نقطة ما بوضع جسم مشحون بشحنة موجبة صغيرة qo وتسمى بشحنة إختبار test charge فإذا تأثرت هذه الشحنة بقوة كهربائية فهذا يعني وجود مجال كهربائي عندها.

وتعرف شدة المجال الكهربائي E في نقطة ما بأنها القوة على وحدة الشحنات الموضوعة في هذا المجال.

$$E = \frac{F}{q_0} \qquad (1)$$

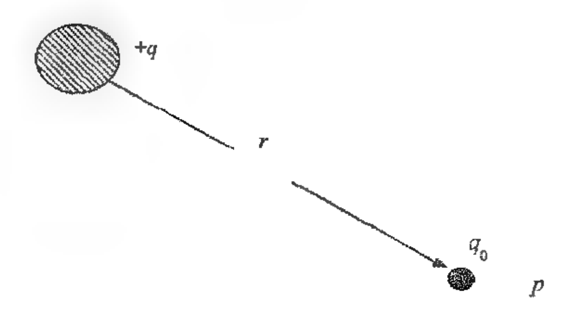
حيث تمثل E المجال الكهربائي، وF القوة (Force) التي يؤثر بها على شحنة اختبار (test charge) موجبة قيمتها q_0 موضوعة في تلك النقطة. ومن هذا التعريف ترى أنه لحساب شدة المجال الكهربائي E عند نقطة ما، فإنه يمكن تخيل وجود شحنة موجبة q_0 في تلك النقطة، ثم حساب القوة التي يؤثر المجال بها على هذه الشحنة، ومن ثم توجد قيمة المجال E من المعادلة (1).



الشكل (1 – 2)

وحدة المجال الكهربائي هي نيوتن لكل كولوم. ومن خصائص شحنة الاختبار Test Charge أنها موجبة و صغيرة جدا.

و قد يكون المجال متجهاً (vector) يحدد بتحديد مقداره واتجاهه معاً، أو يكون قياسياً (Scalar) يحدد بتحديد قيمته (أو مقداره) فقط، فمثلاً يؤثر مجال الأرض على الأجسام الموجودة فيه باتجاه الأرض فهو لذلك مجال متجه، بينما لا تعتمد قيمة مجال مصدر الحرارة على الاتجاه، ولذلك فهو مجال قياسي (ليس له اتجاه). ولإيجاد المجال الكهربائي E الناتج عن شحنة نقطية q، عند نقطة مثل p تبعد عن الشحنة مسافة r، كما في الشكل (2 – 2).



الشكل (2-2)

نفترض وجود شحنة اختبار موجبة صغيرة، مثل q_0 في النقطة. ثم نحسب القوة التي تؤثر بها الشحنة q على شحنة الاختبار q_0، وأخيراً نقسم القوة F على q_0 لإيجاد قيمة E.

$$F = K \frac{q q_0}{r^2}\, \hat{r} \qquad (2)$$

حيث تمثل $\hat{r}$ وحدة متجهات باتجاه r، أي أن:

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{|r|} \qquad (3)$$

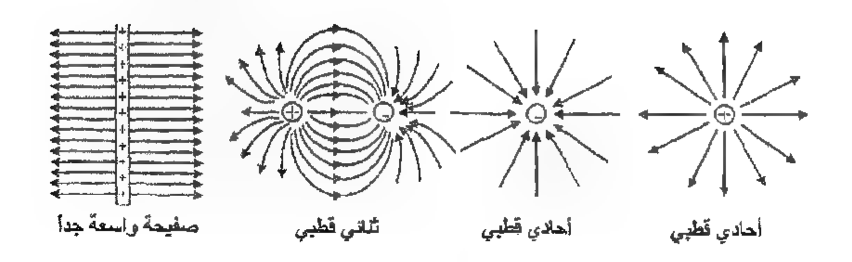
ولإيجاد المجال الكهربائي نعوض قيمة F في المعادلة (1) فتصبح المعادلة بالشكل التالي:

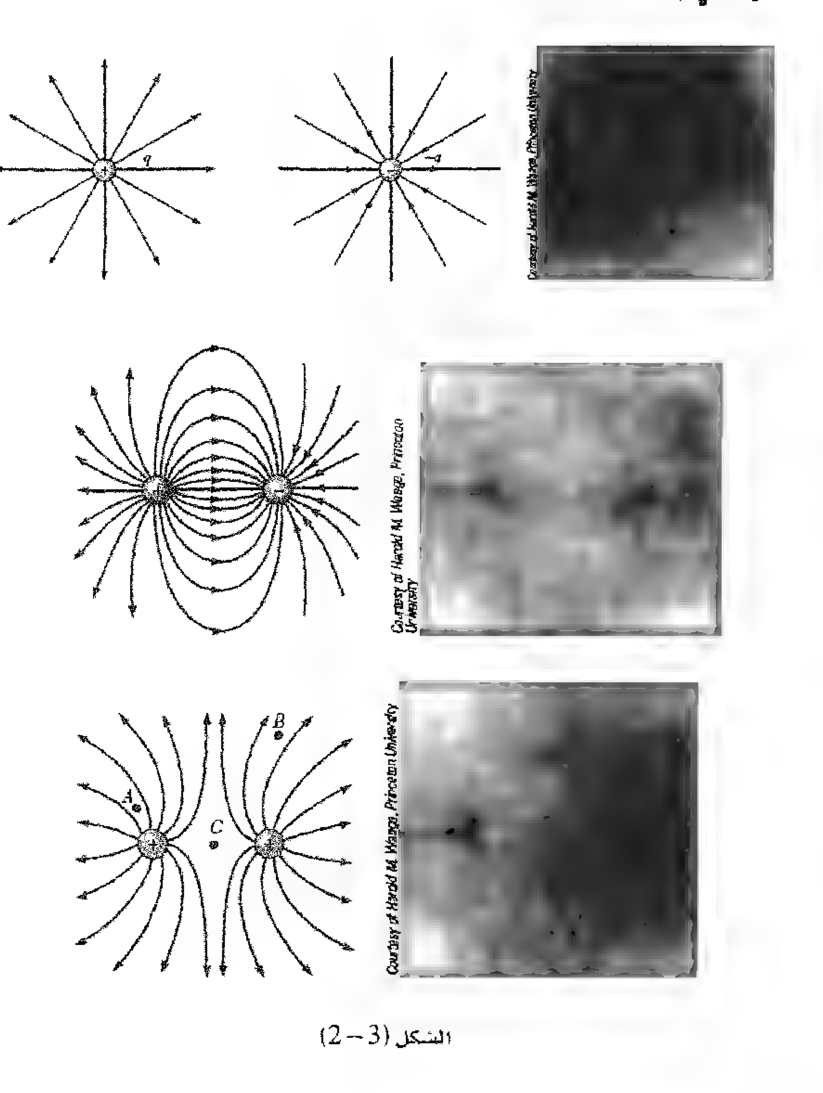
$$E = \frac{F}{q_0} = K \frac{q}{r^2}\, \hat{r} \qquad (3)$$

ونلاحظ من هذه المعادلة أن المجال E لا يعتمد على مقدار شحنة الاختبار q_0، وإنما يعتمد على الشحنة q (مصدر المجال)، وعلى المسافة r (التي تحدد مكان النقطة المراد حساب المجال عندها). وبينما يكون اتجاه المجال E الناتج عن شحنة موجبة هو إتجاه r (مثل اتجاه القوة F) يكون اتجاه المجال E الناتج عن شحنة سالبة يكون عكس اتجاه r.

ويعرف اتجاه المجال الكهربائي على أنه اتجاه القوى المؤثرة على شحنة الاختبار الموجبة كما يسمى مسار هذه الحركة بخط القوة المهربية Line of force وهي خطوط وهمية تستخدم لوصف المجال الكهربائية مقداراً واتجاهاً.

وتمثل الرسومات في الشكل (3 – 2) بعض خطوط القوى حول شحنة موجبة حيث نرى أن خطوط القوي تبدأ منها أي تكون أتجاه الخطوط خارج من الشحنة الموجبة. وكذلك حول الشحنة السالبة حيث تكون اتجاه خطوط القوى متجه إلى الشحنة السالبة.




q
−q
Courtesy of Harold M. Waage, Princeton University
A
B
C
Courtesy of Harold M. Waage, Princeton University

الشكل (3 − 2)

أما في حالة صفيحة طويلة منتظمة الشكل مشحونة بشحنة موجبة فإن خطوط القوى تكون متعامدة على مستوى الصفيحة ومتوازية مع بعضها البعض وتكون قيمة المجال E واحدة لكل النقاط القريبة من الصفيحة. وفي حالة شحنتين موجبة وسالبة يكون المجال عند أي نقطة محصلة المجالين الناشئين عن الشحنتين واتجاه يمثل المماس لخط القوى الكهربائية.

مثال (1 – 4):

احسب المجال الكهربائي لشحنتين متساويتين إحداهما موجبة والأخرى سالبة وقيمة كل منهما q كما ورد في المثال (1 – 2) عند النقاط نفسها a و b و c و d و e مع تحديد الإتجاه.

(أ) في الحالة الأولى:

$$F_a = F_1 + F_2$$

$$= \frac{160}{9} K_e \frac{q q_1}{r^2}$$

$$= \frac{160}{9} \times 9 \times 10^9 \times \frac{0.64 \times 10^{-6} \times 0.32 \times 10^{-6}}{(8 \times 10^{-2})^2}$$

$$= 5.12 \text{ N}$$

$$E_a = \frac{F_a}{q_1} = \frac{5.12}{0.32 \times 10^{-6}} = 1.6 \times 10^{-7} N/C$$

(ب) في الحالة الثانية:

$$F_b = F_2 - F_1$$

$$= -\frac{3}{4} K_e \frac{qq_1}{r^2}$$

$$= -\frac{3}{4} \times 9 \times 10^9 \times \frac{0.64 \times 10^{-6} \times 0.32 \times 10^{-6}}{(8 \times 10^{-2})^2}$$

$$= -0.216 \text{ N}$$

$$E_b = \frac{F_b}{q_1} = \frac{-0.216}{0.32 \times 10^{-6}} = 6.75 \times 10^{-5} N/C$$

(ج) في الحالة الثالثة:

$$F_c = F_1 - F_2$$

$$= 4K_e \frac{qq_1}{r^2}(\frac{1}{9} - 1)$$

$$= -1.024 \text{ N}$$

$$E_c = \frac{F_c}{q_1} = \frac{-1.024}{0.32 \times 10^{-6}} = -3.2 \times 10^{-6} N/C$$

(د) في الحالة الرابعة:

$$F_d = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$= 0.212 \text{ N}$$

$$E_d = \frac{F_d}{q_1} = \frac{0.212}{0.32\times10^{-6}} = 6.625 \times 10^{-5}\ N/C$$

(ه) في الحالة الخامسة والأخيرة:

$$F_e = F_x = F_{1x} + F_{2x} = F_1 \sin\theta + F_2 \sin\theta$$

$$= 2\ F_1 \sin\theta$$

$$= 2 \times 4 \times 9 \times 10^9 \frac{q q_1}{5\, r^2} \sin\theta$$

$$= 0.206\ N$$

$$E_e = \frac{F_e}{q_1} = \frac{0.206}{0.32\times 10^{-6}} = 6.44 \times 10^{-5}\ N/C$$

(3 – 2) تأين الغازات العازلة:

إن الغاز من خصائصه أنه عازل كهربائياً، وعند تطبيق جهد بين قطبين كهربائيين يسري تيار كهربائي بسيط بين الأقطاب ويتناسب طردياً مع الجهد، أي أنه بزيادة الجهد تزداد شدة المجال الكهربائي بين القطبين مما يؤدي إلى انهيار العازل Breakdown وفقدانه خاصية العزل.

وهناك عدة طرق للتأين وهي:

1. التأين بالتصادم:

إن هذا النوع من التأين يعتبر من أهم الطرق التي تؤدي إلى انهيار العازل، ولشرح وتوضيح هذه الطريقة نقوم بافتراض وجود صفيحتين

معدنيتين متوازيتين يفصل بينهما مسافة d، موضوعتين في حجرة اختبار صغيرة ملئت بالغاز، ضغطه P، وعندما يتم تطبيق جهد كهربائي بين الصفيحتين يظهر مجال كهربائي منتظم بينهما، وبإسقاط إشعاع خارجي، وعادة ما تكون أشعة فوق بنفسجية تظهر الكترونات حرة من أحد الصفيحتين (من المصعد)، يتجه الالكترون بشحنة e في مجال كهربائي E، ويكتسب عجلة بقوة مقدارها eE باتجاه المهبط، ويكتسب طاقة حركية مقدارها:

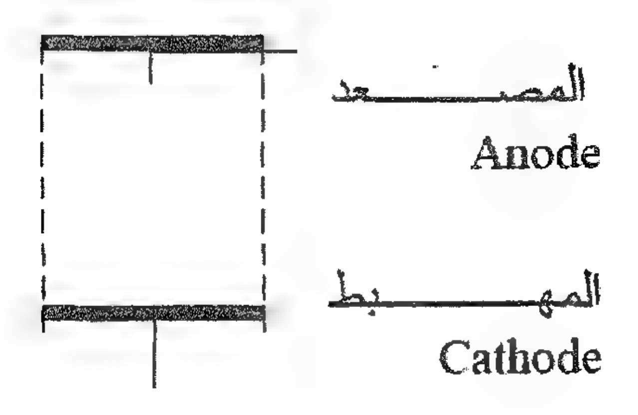
$$U = eE.x = 0.5\ mv^2$$

حيث أن: x هي المسافة التي يتحركها الالكترون من المصعد باتجاه المهبط

m هي كتلة الالكترون

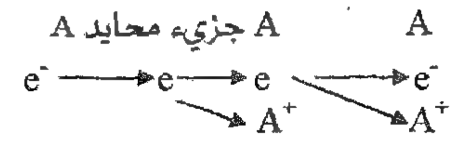
v هي سرعة الالكترون

والشكل (4 - 2) يبين حجرة التأين مع الأقطاب الكهربائية.



الشكل (4 – 2) حجرة التأين مع الأقطاب الكهربائية

إن الالكترون في أثناء مسيره في اتجاه المهبط يصطدم بجزيئات الغاز. وعند الاصطدام فإن الالكترون الذي طاقة حركته كافية يسبب تحلل الجزيئات أو تأين الذرات إلى أيون موجب والكترون سالب.



وتزداد عدد الالكترونات داخل الفجوة بين الأقطاب من خلال حدوث عمليات التصادم المتتالية مكونة كتلة كبيرة تصل إلى المهبط، عندها يتم وصول الالكترون للمهبط كتيار كهربائي في الدائرة الخارجية، وعند ازدياد هذه الالكترونات لتصل إلى أعداد كبيرة تتسبب حينها في تكوين مسار موصل بين الأقطاب مسببة انهيار الفجوة الكهربائية بين الأقطاب.

2. التأين الضوئي:

الالكترونات ذات مستويات الطاقة الأقل من طاقة التأين ev ربما تستطيع عند التصادم إثارة ذرات الغاز إلى مستويات أعلى. ويكون التفاعل على الشكل التالي:

$$A + e + k\ evergy \rightarrow A^{*} + e$$

$$A^{*} \rightarrow A + hv$$

حيث أن: A^{*} تمثل ذرة في وضع الإثارة

A ذرة محايدة

Hv طاقة الفوتون.

تستمر الذرة في وضع الإثارة لمدة تتراوح بين 10^{-7} إلى 10^{-10} من الثانية، تعود بعدها إلى حالة الاستقرار، وتطلق كمية من طاقة الفوتون (hv)، والتي تؤدي بدورها إلى تأين ذرة محايدة أخرى عندما تكون طاقتها الكامنة مساوية أو أقل من طاقة الفوتون.

تسمى هذه الطريقة بطريقة التأين الضوئي، وتمثل بالمعادلة التالية:

$$A = hv \rightarrow A^{*} + e$$

ولكي يحدث التأين يجب أن يتوفر الشرط التالي:

$$hv \geq ev_{i}$$

وعملية التأين الضوئي هي عملية ثانوية لآلية تاونسند للانهيار، وهي عملية مهمة في آلية انهيار العازل بواسطة عمود من الأيونات، وكذلك في بعض عمليات الانهيار بواسطة التفريغ الهالي.

3. التأين بالتفاعل بين الجزيئات التي تحتفظ بالطاقة:

إن كمية من الجزيئات تحتفظ بالطاقة، وهذه الجزيئات تكون في حالة عدم استقرار دائماً، لذا فعند اصطدامها بذرة تفقد الطاقة التي اكتسبتها، وربما تكون هذه الطاقة قادرة على تأين تلك الذرة وخروج الكترونات من المدارات الخارجية لها.

4. التأين الحراري:

تكتسب الالكترونات الحرة الحركة طاقة حرارية عند ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط، وعند اصطدام تلك الالكترونات بذرة متعادلة تفقد هذه الطاقة والتي قد تكون كافية لتأين تلك الذرة.

(4 – 2) ميكانيزم (آلية) تاونسند للانهيار:

بافتراض عدد الالكترونات المنبعثة من الكاثود n_o الكترون، وعندما تصطدم هذه الالكترونات بالجزيئات المتعادلة تتكون الأيونات الموجبة والالكترونات السالبة، وهذا ما يعرف بالاصطدام التأيني. وتعرف α بالعدد المتوسط للتصادمات التأينية للالكترون لكل سنتيمتر في اتجاه المجال الكهربائي، حيث تعتمد α على ضغط الغاز والمجال الكهربائي.

وعند مسافة مقدارها x من الكاثود يكون عدد الالكترونات قد أصبح n_x الكترون، وعند تحرك هذا العدد من الالكترونات لمسافة مقدارها dx يزداد عدد الالكترونات بمقدار $(\alpha x \times dx)$ وعند $x = 0$ فإن عدد الالكترونات $n_x = n_0$، وان $\alpha n_x = dn_x$ او يمكننا القول $n_x = n_o \exp(\alpha x)$

عدد الالكترونات التي تصل إلى الكاثود $(x = d)$ ستكون بمقدار:

$$n_d = n_o \exp(\alpha d)$$

لذلك فمتوسط التيار الكهربائي داخل الثغرة الهوائية والتي تتساوى عدد الالكترونات العابرة في الثانية هو:

$$I = I_o \exp(\alpha d)$$

حيث أن I_0 هو التيار المبدئي عند المصعد.

(5 – 2) الآليات الثانوية المؤدية لزيادة التيار:

كما علمنا بأن بزيادة الجهد تزداد عمليات التأين، وبذلك تزداد احتمالية إضافة الكترونات جديدة بواسطة آليات أخرى، وهذه الالكترونات الإضافية تتسبب في زيادة الشحنة الكهربائية بين الأقطاب، مما يتسبب في زيادة سريعة للتيار الكهربائي بين الأقطاب.

وهذه الآليات هي:

أ. الجزيئات التي تحتفظ بالطاقة المكتسبة:

وهذه الجزيئات يمكن أن تتسبب في عملية التأين للذرات في حالة اصطدامها بذرات تكون الطاقة المكتسبة كافية لإحداث عملية تأين.

ب. الذرات المثارة:

تفقد الذرات المثارة الطاقة الزائدة على شكل فوتونات يمكن أن تؤدي لانبعاث الكترونات من خلال الانبعاث الفوتوني، وهذا النوع من التأين يسمى بالتأين الضوئي.

ج. التأين الحراري:

وتسمى الالكترونات الناتجة من هذا النوع من التأين بالالكترونات الثانوية، حيث أن معامل التأين الثانوي لتاوتسند γ. ويعرف بأنه عدد الالكترونات الثانوية الناتجة لكل أيون موجب، فوتون، جزيء مثار وجزيء محتفظ بالطاقة لفترة طويلة. والقيمة الكلية لـ γ هي مجموع المعاملات من الآليات السابق ذكرها.

$$\Gamma = \gamma 1 + \gamma 2 + \gamma 3 + \dots$$

وبذلك تصبح معادلة التيار الكهربائي كما يلي:

$$I = \frac{I_0 \exp(\alpha d)}{1 - \gamma[\exp(\alpha d - 1)]}$$

وعندما يصبح المقام صفر يصل التيار إلى مالانهاية، فيحدث عندها الانهيار، أي أن الغاز العازل يفقد خاصية العزل.

$$1 - \gamma[\exp(\alpha d - 1)] = 0$$

$$\gamma[\exp(\alpha d - 1)] = 1$$

وهذا ما يسمى بشرط الانهيار.

وعادةً فإن $\exp(\alpha d)$ تكون قيمتها كبيرة جداً، لذلك تختصر المعادلة السابقة إلى:

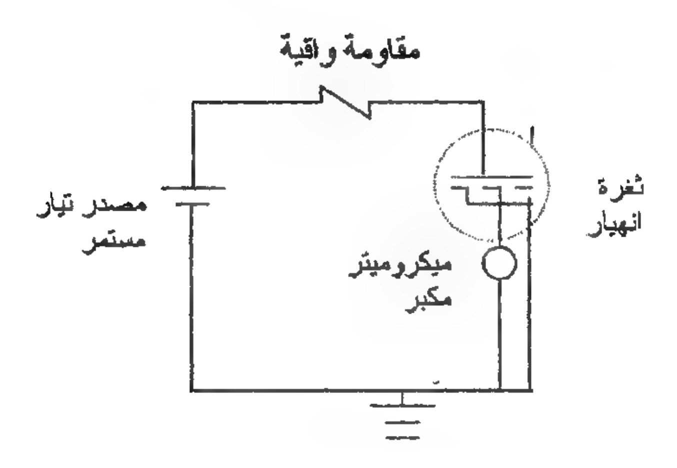
$$\gamma \exp(\alpha d) = 1$$

ولثغرة معينة وضغط غاز معلوم فإن الجهد الكهربائي الذي يعطي قيم α وγ تحقق خاصية الانهيار يسمى جهد الانهيار وتسمى المسافة المناظرة مسافة الانهيار.

(7 – 2) تحديد قيم المعاملات α و γ عملياً:

يتم تحديد قيم المعاملات α وγ من خلال اجراء تجربة عملية وفي هذه التجربة نستخدم قطبين مستويين بينهم مجال كهربائي منتظم، يوصل قطب الجهد العالي بمصدر جهد عال مستمر ومتغير من 5 – 10 كيلو فولت. وقطب الجهد المنخفض من قضيب مركزي وقضيب ستارة، حيث يوصل القضيب المركزي بالارض من خلال ميكروميتر مكبر ذو مقاومة

مرتفعه تصل الى $10^{12}\Omega$، ويتم تأريض قضيب الستارة مباشرة. حينها سوف يقيس الميكروميتر قيم تيارات صغيرة جدا في حدود 10^{-10} امبير، وجميع هذه الاقطاب السابق ذكرها توضع داخل غرفة الاختبار المصنوعة عادة من الزجاج او الصلب الذي لايصدأ. أما الاقطاب فتكون عادة من النحاس الاحمر أو الأصفر، حيث تفرغ حجرة الاختبار من الهواء ثم يتم ملئها بالغاز المراد فحصه ثم تترك لمدة 30 دقيقة لينتشر الغاز في ارجاء الحجرة بأنتظام. والشكل (5 – 2) يوضح الطريقة العملية لقياس معاملات التأين وطريقة ربط وتوصيل العناصر ببعضها البعض.

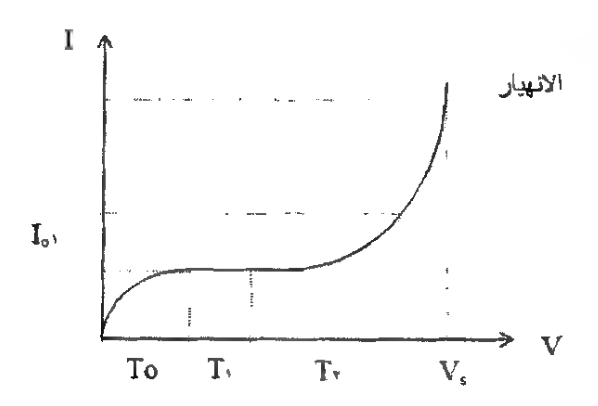


شكل (5 – 2) الطريقه العمليه لقياس معاملات التأين

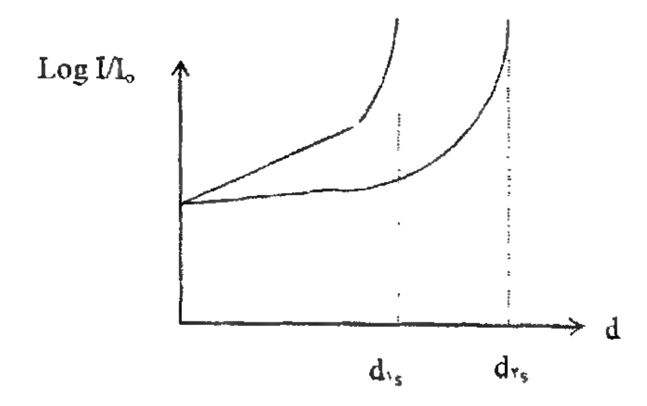
يسلط على المصعد الاشعة الفوق بنفسجية والتي تؤدي الى خروج الالكترونات المبدئية (n_o) ويسمى بالاشعاع الفوتو – كهربائي.

عند تطبيق الجهد المستمر يكون بمقدار ضئيل حيث تبدأ نبضات التيار في الظهور من خلال الألكترونات والأيونات الموجبة وبزيادة الجهد بشكل تدريبي تختفي النبضات ونحصل على تيار مستمر كما هو موضح في الشكل

(6 – 2)، وفي المنطقة T_0 يزداد التيار الكهربائي ببطئ وبشكل غير منتظم. وفي المنطقة T_1 وكذلك المنطقة T_2 يزداد التيار تدريجيا وبانتظام طبقا لميكانيزم تاونسند، حيث انه بعد المنطقة T_2 يزداد التيار وبصورة اكبر وتحدث الشرارة الكهربائية.



شكل (6 – 2) منحنى زيادة التيار طبقا لتاونسند



شكل (7 – 2) العلاقة بين Log(I/Io) ومسافة الفجوة طبقا لتاونسند

ولتحديد قيم المعاملات α وγ لابد لنا بدايتا من الحصول على العلاقة بين التيار والجهد لفجوات كهربائية مختلفة. ونرسم العلاقة بين $Log(I/Io)$ والمسافة بين الاقطاب d عند قيمة متساوية للمجال الكهربائي E، كما هو موضح أعلاه في الشكل (7 – 2). حيث ان انحراف المنحنى الاولي يبين قيمة α وبتحديد مقدار هذه القيمة يمكننا من ايجاد γ من المعادلة العامة للأنهيار لتاونسند. وبنظرة عامة فأن قيم المعاملات α, γ تعتمد على مقدار النسبة بين المجال الكهربائي الى ضغط الغاز (E/P).

(9 – 2) امثلة محلولة:

مثال 1: في تجربة لغاز ما وجد ان تيار الاستقرار هو 5.5×10^{-8} عند 8KV. ومسافة مقدارها 0.4cm بين الأقطاب. بالاحتفاظ بقيمة المجال الكهربائي ثابت، وتقليل المسافة إلى 0.1cm. وجد أن التيار أصبح 5.5×10^{-9}، احسب قيمة المعامل الابتدائي لتاونسند α.

الحل:

التيار عند الأنود:

$$I = I_o \exp(\alpha d)$$

$$\therefore I_2 = I_o \exp(\alpha d_2) \text{ , } I_1 = I_o \exp(\alpha d_1)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_o \exp(\alpha d_1)}{I_o \exp(\alpha d_2)} = \exp \alpha(d_1 - d_2)$$

$$\frac{5.5\times 10^{-8}}{5.5\times 10^{-9}} = \exp \alpha(0.4 - 0.1)$$

$$\therefore 10 = \exp(0.3\alpha)$$

$\therefore 0.3\alpha = \ln(10)$

$\therefore 7.676/\ cm$

(10 – 2) انهيار الغازات سالبة الشحنة:

إن ظاهرة التصاق الالكترون هي عبارة عن اجتذاب الكترونات حرة الحركة إلى الذرة المتعادلة كهربائياً وتكوين أيون سالب، وحيث أن الأيون السالب مثل الأيون الموجب تماماً له كتلة كبيرة جداً نسبياً، لذلك فاحتمالية تحريره الكترونات من الذرات المتعادلة عند اصطدامه بها تكون ضعيفة، ولذلك تمثل عملية التصاق الالكترونات طريقة فعالة لإزالة الالكترونات، والتي تلعب دوراً هاماً في عملية انهيار الغازات تحت الجهود المنخفضة. ويسمى الغاز الذي تلعب فيه عملية التصاق الالكترونات دوراً فعالاً غاز سالب الشحنة. وهي إحدى العمليات الداخلية بالغاز والتي تعطي جهد انهيار كبير للغاز الذي له هذه الميزة. ويوجد عدد كبير من عمليات الالتصاق، ونذكر منها الأكثر فعالية الموجودة بالغازات وهي:

أ. الالتصاق المباشر: وفيه تلتصق الالكترونات مباشرة بالذرات مكونة أيون سالب.

$$AB + e \rightarrow AB^-$$

ومن الأمثلة على هذه الغازات نذكر منها الاكسجين وبعض الغازات الأخرى مثل الغازات المستخدمة كوسائط تبريد (غاز الفريون) والنيتروجين وثاني أكسيد الكربون، وفي مثل هذه الغازات يكون A عادةً ذرة الكربون وB ذرة الأكسجين أو إحدى ذرات أو جزيئات الهالوجينات.

ولمثل هذا الصنف من الغازات يتحتم علينا أن نعدل معادلة تاونسند لزيادة التيار، وذلك لأخذ عمليات التصاق الالكترونات في الاعتبار، ويعرف معامل الالتصاق (η) بعدد التصادمات الالتصاقية بالكترون واحد في سم واحد في اتجاه المجال الكهربائي، وتحت هذه الظروف نقوم بإيجاد التيار الواصل إلى الكاثود من خلال المعادلة التالية:

$$I = I_0 \frac{[\frac{\alpha}{\alpha-\eta} \exp(\alpha-\eta)d] - [\frac{\eta}{\alpha-\eta}]}{1 - \left[\gamma \frac{\alpha}{\alpha-\eta}\right][\exp(\alpha-\eta)d - 1]}$$

وبمساواة المقام بالصفر يمكن أن نحصل على خاصية تاونسند للانهيار كما يلي:

$$\gamma \frac{\alpha}{\alpha-\eta} [\exp(\alpha-\eta)d - 1] = 1$$

ومن خلال هذه المعادلة نستنتج أنه عند α أكبر من η تكون هنالك احتمالية مستمرة لانهيار الغاز بدون النظر بقيم α، η، γ، ومن الجهة الأخرى عندما تكون η أكبر من α يقترب خاصية الانهيار لتاونسند إلى:

$$\gamma[\alpha/(\alpha-\eta)] = 1 \quad \text{او} \quad \alpha = \eta/(1-\gamma)$$

وتكون قيمة γ عادةً صغيرة لا تتجاوز 10^{-4} ويمكننا إعادة المعادلة السابقة بالشكل التالي: $\alpha = \eta$ وعندها يصبح حدود الانهيار بالنسبة للمجال الكهربائي إلى ضغط الغاز (E/P) بحيث لا يحدث أي انهيار عند أي نقطة لأقل من هذه الحدود بغض النظر لمسافة الفجوة بين الأقطاب وقيمة هذا الحد يسمى "النسبة الحرجة بين المجال الكهربائي وضغط الغاز".

(11 – 2) الانهيار في المجالات غير المنتظمة والتفريغ الهالي:

إن انتظام المجال الكهربائي مع الزيادة التدريجية للجهد على الثغرة تحدث انهياراً كهربائياً للثغرة على شكل شرارة كهربائية بدون أي تفريغات تذكر. أما في حال عدم انتظام المجال، فالزيادة في الجهد تتسبب في تفريغات الغاز، وتظهر عند النقاط التي يكون عندها أعلى قيم للمجال الكهربائي أي الزوايا الحادة في الموصلات الكهربائية. نسمي هذ التفريغات بالتفريغ الهالي، ويتم رؤيتها كوميض لامع بلون أبيض مائل إلى الزرقة وتكون مصحوبة بصوت يشبه الأزيز.

تؤدي ظاهرة التفريغ الهالي بخطوط نقل القدرة الكهربائية إلى فقد في القدرة الكهربائية وتؤدي أيضاً إلى تلف العزل الكهربائي ويصاحب تلك الظاهرة تداخل في موجات الراديو والاتصالات.

ونذكر بعض العوامل التي تؤثر بظاهرة التفريغ الهالي بشكل كبير:

أ. طبيعة الجو المحيط (نسبة الرطوبة، درجة الحرارة، المحتوي الكيميائي للغاز المحيط...).

ب. سطح الموصل.

ج. شكل الموصل

وعند اقتراب قيمة المجال الكهربائي من القيمة المطلوبة لحدوث ظاهرة التفريغ الهالي لجهد متردد يسمى بمجال بدء ظاهرة التفريغ، ويمكن إيجاد هذه القيمة لموصلين متوازيين نصف قطر كل منهما r كما يلي:

$$E_w = 30md[1 + \frac{0.301}{\sqrt{d_r}}]$$

وفي حالة الاسطوانتين متحدتي المحور ونصف قطر الأسطوانة الداخلية r تصبح المعادلة بالشكل التالي:

$$E_c = 31md[1 + \frac{0.308}{\sqrt{d_r}}]$$

حيث أن m هي معامل عدم انتظام سطح الموصل و d هو معامل التصحيح لكثافة الهواء النسبية، ويتم إيجادها من خلال المعادلة التالية:

$$d = \frac{3.92P}{(273+T)}$$

حيث أن: P هو الضغط الجوي بوحدة torr.

و T درجة الحرارة بالدرجة المئوية.

ويمكننا اتخاذ بعض الإجراءات للتقليل من حدوث ظاهرة التفريغ الهالي ونذكر من أبرزها:

1. استخدام غاز جاف للعزل.
2. زيادة ضغط غاز العزل.
3. استخدام موصلات ذات سطح أملس.
4. تجنب وجود أحرف حادة للموصل.
5. استخدام موصلات ذات قطر كبير في حالة الجهود العالية والفائقة وذلك من خلال استخدام كوابل متعددة الموصلات.
6. أن تكون أسطح الموصلات ناعمة الملمس.

وسوف نقوم بدراسة أكثر أصناف غازات العزل انتشاراً في منظومات القوى الكهربائية:

(12 – 2) غاز سادس فلوريد الكبريت (SF6):

إن غاز سادس فلوريد الكبريت غاز خامل يتمتع بخصائص عزل جيدة، وكوسيط خامد للشرارة داخل قواطع غاز سادس فلوريد الكبريت، حيث تزداد قوة العزل للغاز بزيادة الضغط، وفي الآونة الأخيرة انتشر استخدام هذا الغاز على نطاق واسع داخل العديد من المعدات الكهربائية مثل المكثفات، المحولات، الكابلات، القواطع، خطوط النقل الكهربائية... ويمكن أن يتحول الغاز إلى سائل عند قيمة معينة للحرارة والضغط، لذا لا بد من استخدامه تحت ضغط وحرارة معينتين للحفاظ على حالته الغازية.

(1 – 12 – 2) خصائص غاز سادس فلوريد الكبريت:

الخصائص الفيزيائية:

أ. لا يشتعل ولا يساعد على الاشتعال.

ب. عديم الرائحة واللون.

ج. ذو كثافة عالية.

د. غير سام.

- **التحول من الحالة الغازية للحالة السائلة:**

يبدأ الغاز بالتحول إلى سائل عند درجة حرارة منخفضة. فعند ضغط مقداره $15kg/cm^2$ ودرجة حرارة 10 درجات مئوية يتحول الغاز إلى سائل أي أنه يصبح غير مناسب للاستعمال لضغط أعلى من $15kg/cm^2$. لذا لا بد من

الاحتفاظ بدرجة الحرارة عند حد معين، لذا لا بد من استخدام طرق معينة للحفاظ على حالته الغازية، وفي تطبيقات الضغط العالي يتم معايرة الثيرموستات الذي يتحكم بسخان كهربائي على درجة حرارة أعلى من 15 درجة مئوية للحفاظ على حالته الغازية.

- **القدرة على نقل الحرارة:**

إن غاز سادس فلوريد الكبريت له قدرة على الانتقال الحراري تساوي ضعفي قدرة الانتقال الحراري للهواء عند نفس الضغط.

- **الثابت الزمني للشرارة:**

إن الثابت الزمني للوسط يعرف بأنه الزمن بين التيار الصفري واللحظة التي تصل عندها الموصلية الكهربائية لمنطقة التلامس إلى الصفر.

(2 – 12 – 2) الخصائص الكيميائية لغاز سادس فلوريد الكبريت:

أ. غاز خامل.

ب. غاز سالب الشحنة.

ج. متزن كيميائياً.

د. لا يتفاعل ولا يؤثر على الأجزاء المعدنية لغاية درجة حرارة 500 درجة مئوية.

ه. أثناء إطفاء الشرارة يتحلل الغاز إلى رابع فلوريد الكبريت وثاني فلوريد الكبريت، حيث تتحد هذه الغازات مرة أخرى لتكون الغاز الأصلي بعد إطفاء الشرارة وعملية التبريد، ولكن ينتج عن التحلل بعض الشوائب السامة والتي من شأنها أن تهاجم بعض مركبات المواد المكونة للقواطع والتركيبات الكهربائية الأخرى.

و. الفلورايد المعدني مادة عازلة جيدة لذلك تستخدم بأمان في المعدات الكهربائية.

ز. يجب الحرص على عدم وجود اي رطوبة بالغاز حيث أن هذه الرطوبة تتسبب في العديد من المشاكل في المعدات الكهربائية.

(3 – 12 – 2) خصائص العزل الكهربائي:

إن خصائص العزل الكهربائي لغاز سادس فلوريد الكبريت يمكن حصرها في عدة نقاط هي:

1) بازدياد مقدار الضغط تزداد شدة العزل للغاز، وفي ضغط مقداره $3kg/cm^2$ يكون مقدار عزل الغاز أعلى من شدة عزل الزيت العازل، وعند مثل هذه القيم تتيح لنا مسافات أقل بين خطوط النقل وحجم أقل للمعدات الكهربائية لنفس الجهد.

2) إن جهد الانهيار للغاز يعتمد على عدة عوامل، من أهمها مقدار نعومة سطح الموصل، شكل الموصل، الرطوبة، قرب عازلات التثبيت، توزيع المجالات،... .

3) شدة العزل للغاز عند الضغط الجوي أعلى منه للهواء بمقدار الضعف، وأقل بمقدار الثلث من شدة عزل الزيت المستخدم في القواطع الزيتية.

4) إذا كان المجال الكهربائي غير منتظم فالعلاقة بين جهد الانهيار وضغط الغاز لا يتبع قانون باشون تماماً.

5) إن عوازل التثبيت لها تأثير مباشر على جهد الانهيار، حيث أن الموصلات الكهربائية داخل المعدات المعزولة بالغاز تثبت مباشرةً على عوازل الأيبوكس، أو البورسلان، حيث يمكن حدوث الانهيار على أسطح العوازل، ويمكن حدوث ذلك عند جهود قليلة إذا كانت أسطح العوازل مغطاة

بالرطوبة والغبار الموصل، لذلك لا بد من المحافظة على العوازل نظيفة تماماً.

6) إن الانهيار عادةً يبدأ من الأطراف الحادة للأجزاء الموصلة، والتي تتركز عندها المجالات الكهربائية العالية، لذلك التنظيم الجيد لتوزيع الإجهادات الكهربائية مهم جداً للمعدات الكهربائية، لذا لا بد من تجنب الأطراف الحادة.

7) إن أحد العوامل التي يعتمد عليها جهد الانهيار هي شكل الموجة الكهربائية، والقطبية التي تميز بأقصى قيمة للجهد، والزمن من الصفر لأقصى قيمة للجهد، وقطبية الموجه، وعامة إن القطبية السالبة أخطر من القطبية الموجبة.

8) الاعتبارات العملية في استخدامات الغاز لأغراض العزل الكهربائي.

إن الخصائص الواجب توافرها في الغاز المستخدم لغايات العزل في تطبيقات الجهد العالي هي:

أ. شدة عزل عالية جداً.

ب. تكلفة اقتصادية مقبولة.

ج. غير قابل للاشتعال.

د. غير سام وغير مضر بالصحة.

ه. خامل كيميائياً.

و. ناقل حراري جيد.

وعند النظر للغازات بشكل عام نجد بأن غاز سادس فلوريد الكبريت له الخصائص السابق ذكرها، مما يجعل منه غاز عزل ذو محط اهتمام الكثير من الشركات المصنعة لكثير من المعدات الكهربائية ذات الجهود العالية.

والجدول (1 – 2) يبين مقدار الجهد الأدنى V_b min للشرارة لأنواع عدة من الغازات والذي يعتمد على الحد الأدنى من حاصل ضرب الضغط للغاز في المسافة بين القطبين، ويعتمد أيضاً على نوع مادة المصعد.

جدول (1 – 2) الجهد الأدنى للشرارة:

اسم الغاز	الوزن الجزيئي	درجة الانصهار 760torr	الوزن الجزيئي	درجة الغليان 760torr	شدة العزل	ثابت العزل	القابلية للاشتعال	مدى سميته
الهواء	—	29	—	-194	1	1	لا	غير سام
النيتروجين	N_2	28	—	-196	1	1	لا	غير سام
الهيدروجين	H_2	2	-210	-253	—	1	نعم	غير سام
كربون تيترا فلوريد	CF_4	88	-259	-128	1.01	1.0006	لا	غير سام
هيكس فلوريد ميتان	C_2F_6	138	-183	-78	2.02	1.002	لا	غير سام
بيرفلورد بروبان	C_3F_5	188	-101	-37	2.6	—	لا	غير سام
بيرفلورد بيتان	C_4F_{16}	200	-80	+2	3.6	—	لا	غير سام
سولفور هيكسا فلوريد	C_4F_3	146	—	-63	62.5	1.0002	لا	غير سام
هواء SF_6+70%	SF_6	—	—	—	2.0	1.001	لا	غير سام
فريون 12	CCl_8F_2	121	-158	-18	2.46	1.0016	لا	غير سام

(13 – 2) انهيار العوازل السائلة:

في بعض معدات الكهرباء يتطلب منا استخدام وسيط عازل ذو وظيفة إضافية وهي التبريد، حيث يتم تبريد تلك المعدات من خلال وسيط العزل السائل، إن السائل الأمثل لمثل هذه التطبيقات كالمحولات، القواطع، المكثفات وكابلات الجهد العالي هو زيت البترول، ويعتبر زيت البترول من أكثر الزيوت استخداماً كعوازل سائلة، وفي بعض الأحيان نستخدم أيضاً الهيدروكربونات الصناعية، والهيدروكربونات الهالوجينية. ويتم استخدام زيوت السيليكون، والهيدروكربونات التي تحتوي على الفلوريد في المعدات ذات درجات الحرارة العالية. وفي الآونة الأخيرة تم البدء باستخدام بعض الزيوت النباتية والأسترات.

إن العوازل السائلة عادةً ما تكون خليطاً من الهيدروكربونات الضعيفة الاستقطاب، والتي يجب أن تكون خالية من الرطوبة ومنتجات الأكسدة والملوثات الأخرى، والتي تؤثر تأثيراً كبيراً على شدة العزل للزيوت العازلة. ومن الخصائص الهامة المطلوبة للزيوت العازلة الموصلية الكهربائية وثابت العزل وشدة العزل. بالإضافة إلى ذلك فالخصائص الفيزيائية والكيميائية مثل اللزوجة والاتزان الحراري والجاذبية النوعية هامة أيضاً. عملياً يتم اختيار العازل السائل لتطبيق معين على أساس الاتزان الكيميائي.

(1 – 13 – 2) العوازل السائلة النقية:

العوازل السائلة هي السوائل النقية كيميائياً ولا تحتوي حتى على نسبة $1{:}10^9$ من الشوائب وتركيبها الكيميائي بسيط مثل – هيكسان ون – هيبتان والهيدروكربونات البرافينية الأخرى.

على الجانب الآخر فالعوازل السائلة التجارية تكون غير نقية كيميائياً، وتحتوي على خليط من الجزيئات العضوية المركبة، والتي لا يمكن بسهولة إعادة إنتاجها في تجارب متسلسلة.

تنقية زيوت العزل:

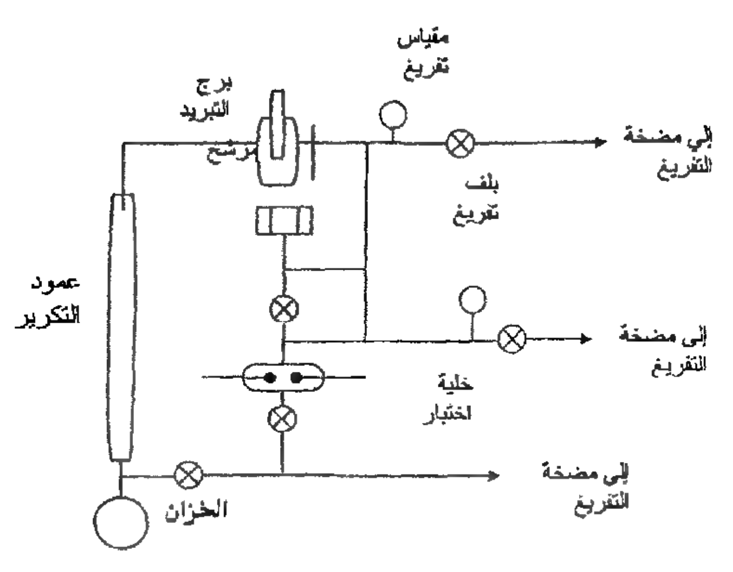
إن زيوت العزل تحتوي على نسبة من الشوائب والغبار المعدني والرطوبة. والشوائب الأيونية هي الشوائب الرئيسية الموجودة بالزيوت العازلة، والتي تقلل كثيراً من شدة العزل. وهنالك طرق عديدة توظف بتنقية الزيوت العازلة هي الترشيح (الفلترة)، من خلال ترشيح ميكانيكي وترشيح كهروستاتيكي، وسحب الغازات وقوة الطرد المركزي والتقطير والتعامل الكيميائي. جزيئات الغبار المعدني يمكن إزالتها بواسطة الترشيح والغازات، مثل الاكسجين وثاني أكسيد الكربون، يمكن إزالتها بواسطة التقطير وإزالة الغازات والشوائب الأيونية، مثل بخار الماء يمكن إزالتها بواسطة أجهزة تجفيف، أو التجفيف الفراغي، وأحياناً يتم إضافة حمض الكبريتيك المركز إلى العوازل السائلة، وترج جيداً لإزالة الشمع والأجزاء المتبقية ثم تشطف بالصودا الكاوية والماء المقطر. والجدول (2 - 2) يبين مقدار شدة العزل لمواد عزل مختلفة عند درجة حرارة مقدارها 20 درجة مئوية.

جدول (2 – 2) شدة العزل:

الخاصة	زيت المحولات	زيت الكبريت	زيت المكثفات	زيوت السيليكون	الأسكرال
شدة العزل عند $20C^{O}$ على 2.5MM موصلات كروية قياسية KV/mm	15	30	20	30 - 40	20 - 25

(2 – 13 – 2) اختبار العوازل السائلة:

تجري عادةً اختبارات الانهيار داخل خلايا اختبار صغيرة لاختبار عينة الزيت بعد التنقية. الأقطاب الكهربائية المستخدمة داخل خلية الاختبار لقياس جهد الانهيار عادةً ما تكون كرات قطرها يتراوح بين 0.5 إلى 10 سنتيمتر، والثغرة بين الأقطاب تتراوح بين 100 إلى 200 ميكروميتر، في بعض الأحيان تستخدم الأقطاب المستوية، والتي هي عبارة عن مستويين متوازيين. جهد الاختبار يتراوح بين 50 إلى 100 كيلوفولت. والشكل (8 – 2) يبين آلية نظام تنقية لزيت عازل مع وجود خلية اختبار.



شكل (8 – 2) نظام تنقية مع خلية اختبار

(3 – 13 – 2) الانهيار في العوازل النقية السائلة:

تتراوح موصلية العازل من 10^{-18} إلى 10^{-20} (فولت/سم) عند مجال كهربائي أقل من 1KV/cm مع الأخذ بعين الاعتبار احتمال وجود بعض الشوائب حتى بعد عملية التنقية، حيث تتبقى الفقاعات الغازية والجزيئات العالقة، وتتسبب هذه الشوائب في انخفاض شدة العزل ويتأثر ميكانيزم الانهيار بهذه الشوائب.

وعندما يصل المجال الكهربائي لأعلى من 100KV/cm فإن التيارات الكهربائية تزداد بسرعة وتتغير قيمها بسرعة وتنتهي بعد وقت قصير.

عند المجال الكهربائي الصغير يتكون التيار الكهربائي نتيجة تحلل الأيونات، وعند القيم المتوسطة للمجال الكهربائي يصل التيار الكهربائي إلى قيمة التشبع، وعند المجال الكهربائي العالي تتولد التيارات نتيجة انبعاث

الالكترونات من المصعد Cathod نتيجة المجال العالي والتي تتضاعف بواسطة آلية تاونسند وتزداد التيارات حتى يحدث الانهيار.

الآلية الصحيحة لزيادة التيار غير معروفة بالضبط، ويعتمد جهد الانهيار على المجال الكهربائي ومسافة الثغرة بين الأقطاب الكهربائية ودرجة حرارة الكاثود، بالإضافة إلى لزوجة السائل ودرجة حرارة السائل وكثافة السائل والتركيب الجزيئي له. يبين الجدول (3 – 2) اقصى قيمة لجهد الانهيار لبعض السوائل النقية والغازات المسالة.

جدول (3 – 2) يبين اقصى قيمة لشدة العزل لبعض السوائل العازلة:

السائل	اقصى قيمة لشدة العزل MV/cm
الهيليوم السائل	0.7
النيتروجين السائل	1.6 – 1.9
الهيدروجين السائل	1
الأرجون السائل	1.1 – 1.4
زيت المحولات	1
سيليكون	1 – 1.2
بنزين	1.1
هيكسان	1.1 – 1.3
الأوكسجين السائل	2.4

وتعتمد آلية ميكانيزم الانهيار لتلك السوائل على عدة عوامل هامة، مثل: طبيعة وحالة الأقطاب الكهربائية، والخصائص الفيزيائية للسائل والشوائب والفقاعات الغازية الموجودة بالسائل. ولكل منها تأثيره الخاص على عازلية السائل وهي:

1) وجود شوائب (Particles):

عند تطبيق جهد عالٍ ينشأ مجال كهربائي بين القطبين شدته E. وإذا كان سماحية الشوائب ε_1 (Particles Permitivity) اكبر من سماحية العازل السائل ε_2 فإنه ينشأ قوة تدفع بالشوائب للمساحة التي يكون فيها المجال الكهربائي أعلى ما يمكن. فإذا كانت الشوائب كروية لها نصف قطر r فإن القوة تعطى بالعلاقة التالية:

$$F = \frac{1}{2} r^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} . \nabla E^2$$

وعندما تتجه هذه الشوائب باتجاه المنطقة التي يكون فيها المجال الكهربائي أعلى ما يمكن فإنها تتابع حتى تصل ما بين القطبين مما ينشأ عنه توصيل ثم انهيار كهربائي.

2) وجود ماء:

عند وجود قطرات من الماء في العازل السائل فإنها تستطيل في اتجاه المجال الكهربائي مما يؤدي إلى التوصيل بين القطبين وحدوث الانهيار الكهربائي.

3) وجود فقاعات هوائية:

يوجد في بعض الأحيان فقاعات غازية في السائل العازل إما نتيجة لوجود شرخ في الإطار الخارجي أو وجود نتوءات في أحد الأقطاب. وعند تطبيق الجهد بين القطبين ينشأ مجال كهربائي شدته $E = V/d (KV/cm)$ وحيث أن شدة العزل للهواء أقل منه للعازل السائل فإن الوسط الغازي داخل الفقاعة الغازية سينهار، مما ينشأ عنه شرارة كهربائية وبخار، مما يؤدي إلى توليد المزيد من الفقاعات حتى تملأ الفراغ الموجود بين القطبين، مما ينشأ عنه انهيار كامل للوسط العازل بين القطبين الكهربائيين.

(14 – 2) العوازل الصلبة:

يتم في كل أنواع الدوائر الكهربائية والمعدات الكهربائية استخدام بعض المواد الصلبة لعزل الموصلات الكهربائية، وهذه المواد الصلبة لا بد أن يتوافر فيها بعض الخصائص بالإضافة إلى خاصية العزل الجيد، ومن أهم تلك المواصفات:

أ. المقاومة العالية للتلف الحراري والكيميائي.

ب. شدة ومتانة ميكانيكية عالية.

ج. خلوها من الرطوبة والفقاعات الغازية.

حيث أنه للعوازل الصلبة شدة عزل أكبر من نظيراتها السائلة أو الغازية كما أن العوازل الصلبة تتميز بسهولة التعامل معها بقدر أكبر من نظيراتها الأخرى.

(1 – 14 – 2) الانهيار في العوازل الصلبة:

إن العوازل المصنوعة من اللدائن تعاني من ضعفها في مقاومة الشرارة الكهربائية والتفريغ الكهربائي، مما يجعلها عرضة للانهيار عند حدوث الشرارة الكهربائية، ويحدث الانهيار بعدة أشكال، حيث يمكن أن يحدث الانهيار على سطح العازل وتسمى بظاهرة التسيير، وفي أحيان أخرى يحدث في داخل العازل وتسمى في هذه الحالة بظاهرة التشجير، وسوف نقوم بدراسة هاتين الظاهرتين:

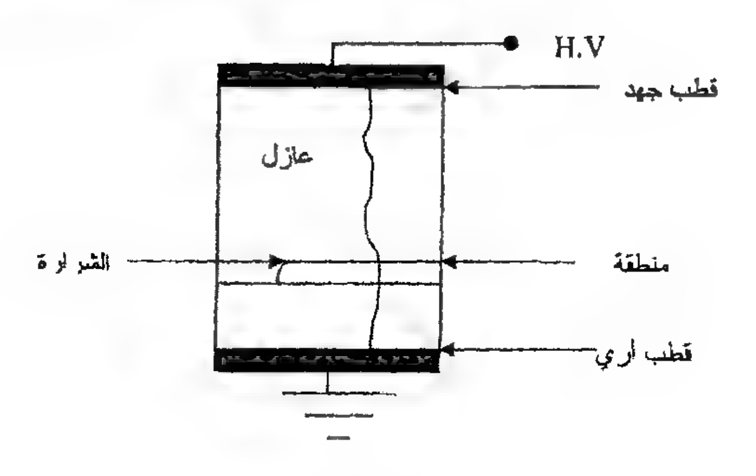
أ. انهيار سطح العازل:

يحدث هذا النوع من الانهيار على سطوح العوازل الصلبة المستخدمة في الأجهزة أو في الأماكن المعرضة للتلوث، مثل المواقع القريبة من البحر أو المناطق الصناعية، حيث تحمل الرياح الأملاح والغبار ومخلفات المصانع والتي عادةً ما تكون مواد أيونية شبه موصلة وترسبها على أسطح العوازل. وعندما يكون السطح جافاً يتسرب تيار ضئيل Leakage Current من النوع السعوي وعند تبلل السطح بالرطوبة أو الترشيح والضباب والرش فإن سطح العازل يصبح مبتلاً، وبذلك تزداد شدة وقيمة التيار المتسرب بصورة كبيرة وتكون قيمته حقيقية.

ومع ازدياد حرارة العازل نتيجة لمرور التيار فإن سطح العازل المبتل يجف في بعض المناطق التي تكون فيها كثافة التيار أعلى ما يمكن، وعادةً ما تكون هذه المناطق قريبة من أقطاب الجهد العالي، وتصل درجة الحرارة على السطح إلى درجة الغليان مما ينتج عنه تبخير الرطوبة الموجودة على السطح وتكوين مناطق جافة صغيرة على شكل حزام Dry Bands تفصل بين القطبين، فينطبق فرق الجهد بين القطبين على هذه المنطقة والتي تكون

المسافة بين طرفيها صغيرة جداً فتزداد شدة المجال الكهربائي بين طرفيه حيث إن $E=v/d$ و d هي المسافة بين القطبين، فتنهار الثغرة الموجودة بين طرفي المنطقة الجافة والتي يكون الوسط فيها عبارة عن هواء كما هو موضح في الشكل (9 – 2).

وإذا ما استمر السطح في البلل فإن الشرارة ستستمر، مما ينتج عنها حرارة ربما تكون كافية لتكسير الروابط التساهمية للعازل المصنوع من اللدائن (هيدروكربونات)، والتي تكون بين الكربون والهيدروجين $C - H$، مما يجعل الكربون يظهر على سطح العازل على شكل نقاط متفرقة بينما يصعد الهيدروجين على السطح ويلتقي مع الأكسجين مما يتولد عنه ماء H_2O، الذي يزيد بدوره عملية البلل واستمرار الشرارة والتي تؤدي في بعض الأحيان إلى تآكل السطح Erosion الذي يضعف العازل ميكانيكياً. وتستمر العملية بنفس الطريقة السابقة حتى يتكون الكثير من نقاط الكربون تتصل فيما بينها في النهاية مكونة قناة كربونية تصل بين القطبين العلوي والسفلي، حيث تكون موصلة وتسمح بمرور التيار وبذلك ينهار العازل الكهربائي ويفقد خاصية العزل، وقد تؤدي زيادة الحرارة الناشئة عن مرور التيار في بعض العوازل إلى تلفها بالحريق. وفي العوازل الجيدة التي لا تتأثر بالشرارة مثل العوازل المصنوعة من البورسلين والزجاج فإن الظاهرة السابقة لا تتم لأنها مواد خاملة وينشأ بين القطبين بدلاً من ذلك قوس كهربائي Flashover.



الشكل (9 – 2)

ب. انهيار داخل العازل (التشجير):

عادةً ما ينشأ هذا النوع من وجود جيوب هوائية مفرغة داخل العازل، وعند تطبيق جهدٍ عالٍ بين قطبين كهربائيين أحدهما مدبب Point Electrode والآخر مسطح Plain Electrode فإن الوسط الهوائي داخل العازل الصلب سينهار نظراً لأن شدة المجال الكهربائي E عند القطب المدبب هي أعلى ما يمكن، وتفوق شدة الانهيار الكهربائي للهواء فينتج عنه تفريغ جزئي Discharge Partial يعمل على تآكل العازل داخلياً، ويحدث شرخ صغير عند الحواف المدببة للجيب الهوائي نتيجة لتمركز المجال الكهربائي عند هذه الحواف الحادة مما يزيد من نشاط التفريغ الجزئي واتجاه الشروخ الصغيرة الميكروسكوبية باتجاه المجال الكهربائي، الذي تقع خطوطه بين القطبين الكهربائيين، وتفرعها على شكل شجيرات Trees حتى تصل بين القطبين، ونتيجة لترسب الكربون على سطح هذه القنوات

الميكروسكوبية فإنها تصبح موصلة فينهار العازل، وتسمى هذه الظاهرة بالتشجير Treeing.

وعادةً ما تحدث هذه الظاهرة في الكابلات المصنوعة من مادة البولي إيثيلين والتي تعمل عند جهود عالية. وفي المناطق ذات منسوب المياه العالي تتشرب الكابلات المصنوعة من مادة البولي إيثيلين نسبة من الماء تختزن في الجيوب الهوائية الناتجة من عيوب التصنيع وعند تعرضها للمجال الكهربائي أثناء عمل الكابل تستطيل هذه الجيوب المائية حتى تصل بين الموصل والغلاف المعدني المؤرض للكابل، مما يؤدي إلى انهيارها، وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة التشجير المائي Water Treeing.

ج. **الانهيار الحراري:**

تزداد قيمة جهد الانهيار للعازلات الصلبة مع زيادة سمك العازل حتى درجة معينة، بعده يتحدد التوصيل الكهربائي بالعازل بناءً على الحرارة المتولدة داخله. وعند تطبيق الجهد على العازل يمر تيار توصيل صغير جداً خلال المادة. يتسبب التيار في زيادة درجة حرارة العازل وتنتقل الحرارة المتولدة للوسط المحيط بالتوصيل خلال العازل وبالإشعاع من سطح العازل. ويحدث الاتزان عندما تتساوى قيمتا الحرارة المتولدة داخل العازل والحرارة المفقودة بالتوصيل والإشعاع.

الحرارة المتولدة تحت تأثير التيار المتردد هي:

$$w = \frac{E^2 \varepsilon_r \ f \tan\delta}{1.8 \times 10^{12}} \ w/cm^2$$

حيث أن:

E هي القيمة الفعالة للمجال الكهربائي

f التردد Hz

δ هي زاوية الفقد للعازل

ε_r هي السماحية النسبية للعازل

ويتم إيجاد كمية الحرارة المفقودة من خلال المعادلة التالية:

$$w_T = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div}(K.\text{grad } T)$$

حيث أن:

C_v هي الحرارة النوعية للعينة التي تم إجراء الاختبار عليها

T هي درجة حرارة عينة الاختبار

K هي الموصلية الحرارية للعينة

t هو زمن الفقد الحراري

ويحدث الاتزان الحراري عندما تتساوى كمية الحرارة المتولدة مع كمية الحرارة المفقودة وعند زيادة كمية الحرارة المتولدة عند كمية الحرارة المفقودة يحدث الانهيار حينها.

د. الانهيار الكهروميكانيكي:

عندما يتعرض العازل الصلب لمجالات كهربائية عالية يمكن أن يحدث الانهيار بسبب قوى الضغط الكهروستاتيكية، والتي يمكن أن تزيد عن أقصى قيمة ضغط ميكانيكية يتحملها العازل. لو افترضنا أن سمك عينة الاختبار d_o وتم ضغطها لسمك d تحت جهد كهربائي V فإن إجهاد الضغط الميكانيكي يكون متعادلاً إذا كان:

$$\varepsilon_o \varepsilon_r \frac{V^2}{2d^2} = y \ln\left(\frac{d_o}{d}\right)$$

$$V^2 = d^2\left(\frac{2y}{\varepsilon_o \varepsilon_r}\right) \ln\left(\frac{d_o}{d}\right)$$

وغالباً يحدث الاتزان الكهروميكانيكي عندما:

$$d/d_o = 0.6 \quad \text{or} \quad d_o/d = 1.67$$

لذا تكون أكبر قيمة لمجال كهربائي قبل الانهيار هي:

$$E_{max} = \frac{V}{d_o} = 0.6\sqrt{\frac{y}{\varepsilon_o \varepsilon_r}}$$

حيث أن:

ε_o هي سماحية الفقاعة الغازية

ε_r هي السماحية النسبية للعازل

٥. التلف والانهيار الكيميائي والكهروميكانيكي:

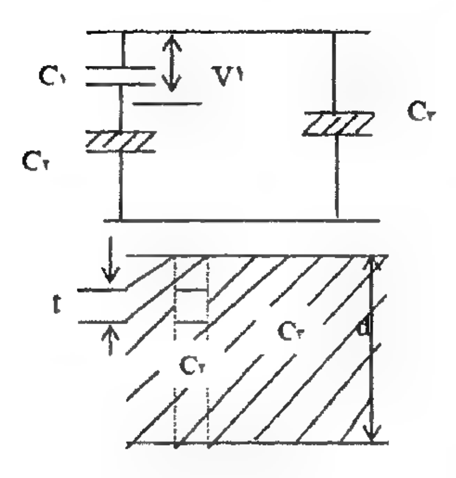
في وجود الهواء وبعض الغازات تحدث لبعض المواد العازلة تغيرات كيميائية عندما تتعرض هذه المواد لإجهاد كهربائي مستمر. بعض التفاعلات الكيميائية الهامة التي يمكن أن تحدث للعوازل الصلبة هي:

- **التأكسد:** في وجود الهواء أو الأكسجين تتأكسد بعض المواد مثل المطاط والبولي إيثيلين مما يؤدي إلى الزيادة في شقوق السطح.
- **التحلل المائي:** في وجود الرطوبة أو بخار الماء على سطح العازل الصلب يحدث التحلل المائي وتفقد المادة خصائصها الكهربائية والميكانيكية. الخصائص الكهربائية للمواد مثل الورق والقطن والمواد السليولوزية الأخرى، تتضرر بصورة كبيرة من هذا التحلل المائي. المواد البلاستيكية مثل البولي إيثيلين ينخفض عمرها الافتراضي بصورة ملحوظة.
- **التفاعل الكيميائي:** حتى في غياب الإجهاد الكهربائي يمكن أن يحدث تأثير كيميائي كبير على المواد العازلة نتيجة العديد من العمليات مثل عدم الاتزان الكيميائي عند درجات الحرارة العالية، التأكسد والشقوق في وجود الهواء والأوزون، والتحلل المائي نتيجة وجود الرطوبة والتسخين.

(2 – 14 – 2) الانهيار بسبب التفريغ الداخلي:

المواد العازلة الصلبة وبصورة أقل العوازل السائلة تحتوي على فقاعات هوائية داخل الوسط أو عند الحدود بين الموصلات والعازل. وتمتلئ هذه الفقاعات بوسط له ثابت عزل أقل من تلك التي للعازل. لذلك فإن شدة المجال الكهربائي داخل هذه الفقاعات أعلى منها خلال العازل، لذلك فإنه حتى تحت الجهد العادي فإن المجال الكهربائي داخل هذه الفقاعات ربما يزيد عن قيمة الانهيار وربما يحدث الانهيار للعازل مبتدئاً بالفقاعات.

فلو افترضنا أن هنالك عازل صلب بين قطبين كهربائيين كما في الشكل المبين أدناه (10 – 2) نقوم بتقسيم العازل إلى ثلاثة أجزاء، حيث يمكننا تكوين دائرة مكافئة مكونة من C_1 وC_2 وC_3 كما هو موضح في الشكل (2 – 10).



الشكل (10 – 2) التفريغ الكهربائي داخل الفقاعة والدائرة المكافئة لهذه الحالة

حيث أن C_1 تمثل سعة الفراغ

C_2 تمثل سعة العازل على التوالي مع الفراغ

C_3 تمثل سعة الجزء المتبقي من العازل

وعند تسليط جهد مقداره V من خلال الأقطاب الكهربائية فإن قيمة الجهد الواقع في الفراغ V_1 يمكن إيجادها من خلال المعادلة التالية:

$$V_1 = \frac{Vd_1}{d_1 + \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1}\right)d_2}$$

حيث إن d_1 وd_2 هما سمك الفقاعة والعازل على التوالي، ولهما سماحية مقدارها ε_0 وε_r على التوالي.

ودائماً تكون d_1 أقل بكثير من d_2 لذلك فإن:

$$V_1 = V\varepsilon_r \left(\frac{d_1}{d_2}\right)$$

(3 – 14 – 2) العوازل الصلبة المستخدمة عملياً:

تستخدم العوازل الصلبة المصنعة من مواد عدة، حيث يمكن أن تكون مواد طبيعية عضوية مثل المطاط والورق، وأحياناً أخرى تكون عبارة عن مواد صناعية غير عضوية مثل الزجاج والسيراميك وبعض أنواع اللدائن أو الميكا.

ونظراً لتعدد أنواع اللدائن واختلاف بعض خصائصها الناجمة عن اختلاف تركيبها الكيميائي أو اختلاف في طرق تصنيعها، فقد تم تصنيفها إلى عدة أصناف لتمييزها عن العوازل الصلبة الأخرى. في صناعة الكابلات تم تصنيف اللدائن إلى نوعين هما: البلاستيك والمطاط الصناعي، حيث يعرف البلاستيك بأنه المادة التي تنشأ عن اللدائن الصناعية. ويتم تشكيلها وهي في الحالة السائلة من خلال استخدام الضغط والحرارة، والبلاستيك يتم تقسيمه إلى نوعين رئيسيين هما: ثيرموبلاستيك، والثيرموسيتينغ.

(15 – 2) المواد العازلة الطبيعية:

(1 – 15 – 2) الورق:

الورق المستخدم عادة في عمليات العزل الكهربائي يكون دائماً من نوعية خاصة وهو ورق رقيق جداً أو ورق لف 1سم، سمك وكثافة الورق تعتمد على

التطبيق، فمثلاً الورق ذو الكثافة القليلة 0.8 يفضل في مكثفات التردد العالي والكابلات. بينما الورق ذو الكثافة المتوسطة يستخدم في مكثفات القوى. والورق ذو الكثافة العالية يفضل في التيار المستمر ومكثفات تخزين الطاقة وكعازل في آلات التيار المستمر. وبالرغم من أن الورق يمتاز بخواص كهربائية جيدة وهو في الحالة الجافة إلا أن طبيعته المسامية تجعله شديد الامتصاص للرطوبة وللتغلب على هذه المشكلة يغمر الورق بعد تجفيفه تحت الحرارة والتفريغ في مركب خاص من مشتقات البترول. ثابت العزل النسبي للورق المشبع يعتمد على سماحية السليلوز المكون للورق وسماحية الزيت وكثافة الورق.

أ - شرائح ورق البولي بروبلين:

يرمز لشرائح ورق البولي بروبلين بالرموز PPL, PPLP, BICCLAM وهي مواد عازلة ذات فقد منخفض، وتصنع على شكل شريط من الورق. وتتكون من طبقة من مادة البولي بروبلين المبثوق بحيث تلحم بين طبقتين من الورق. يكون الشكل الخارجي للشريط على شكل شريط من الورق بحيث يمكن استخدامه بنفس طريقة تقنية التشبيع المستخدمة في الورق المشبع، وكذلك الطرق المستخدمة في اللف.

تتميز شرائح ورق البولي بروبلين بالمزايا الآتية:

- لها زاوية فقد منخفضة Tan δ.
- تعمل عند درجة حرارة عالية.
- لهما سماحية Permittivity منخفضة.
- لها شدة ميكانيكية عالية.

(2 – 15 – 2) سوائل ومركبات التشبيع:

يكون للورق خواص كهربائية جيدة عندما يجفف ويشبع ببعض السوائل والمركبات المناسبة والتي تساعد في تقليل امتصاصه للرطوبة. يتم التشبيع بالتسخين $120C^{o}$ ويفرغ الهواء من الورق والرطوبة عند ضغط يتراوح بين 10 إلى 20نيوتن/م^2 حتى نضمن بأن كل المصفوفة قد تم ملؤها بالمادة المشبعة. وينخفض محتوى الرطوبة في الورق من 2 إلى 7٪ إلى ما يقارب 0.01 إلى 5٪ حسب الجهد. كما يجب التأكد من ملء النتوءات والفراغات بين الورق بالمادة المشبعة حتى تقل التفريغات الجزئية عند الجهود العالية خاصة في الكابلات ذات جهود أعلى من 6.6KV. تتكون المادة المشبعة من الزيت المعدني المكرر المشتق من الزيت الخام، ويستخدم هذا النوع في كابلات التوزيع الصلبة. بالنسبة للمشبع المكون من الزيت والغراء يثقل الزيت بإضافة الغراء المستخرج من شجر الصنوبر لزيادة لزوجته، لتتناسب مع درجة الحرارة التي يعمل عندها الكابل. وبإضافة الغراء تزداد الشدة الكهربائية وتتحسن المقاومة لعمليات التأكسد. بالنسبة للكابلات المثبتة عمودياً والمائلة عادة ما يحدث نزوح للزيت من منطقة لأخرى، لذلك عدلت خواص المادة المشبعة بإضافة بعض المواد الشمعية دقيقة التيلور والبولي إيثيلين والبولي إيزوبيتلين وقليل من غراء الصنوبر للزيت المعدني مما يساعد على جعل الورق في الكابل مشبع على الدوام، ويسمى هذا النوع بالتشبيع الكلي المقاوم للتسرب.

(3 – 15 – 2) الميكا ومشتقاتها:

الميكا اسم مشتق لنوع من بلورات السيليكون المعدنية للألومينا والصودا الكاوية. ويمكن تقسيمها إلى شرائح رقيقة متساوية. وتجمع الميكا خصائص كهربائية عدة مثل شدة العزل العالية وفقد العزل المنخفض ومقاومة درجة الحرارة العالية وقوتها الميكانيكية الجيدة لذلك يتم استخدام الميكا في العديد من المعدات الكهربائية. وتستخدم الميكا النقية في تطبيقات التردد العالي. وتستخدم الميكا التجارية (التي تحتوي على شوائب) في عوازل الجهد المنخفض والمفاتيح الكهربائية، وآلات التيار المستمر وملفات العضو الدوار ومعدات التبريد والتسخين الكهربائية.

(4 – 15 – 2) الزجاج:

إن للزجاج ثابت عزل يتراوح بين 4 إلى 10، وكثافة تتراوح بين $2.5\text{-}6g/cm^3$ وتتراوح المقاومة النوعية ما بين $\Omega.cm$ 10^{20} - 10^{12}، بينما يتراوح فقد العازل للزجاج بين 0.02 إلى 0.004، وشدة العزل للزجاج تتراوح بين $(3\text{–}5MV/cm)$ حيث أن هذه الشدة تقل بارتفاع درجة الحرارة، حيث تصل عند 100 درجة مئوية إلى النصف.

(5 – 15 – 2) السيراميك:

إن السيراميك ذو السماحية القليلة $\varepsilon_r < 12$ يستعمل كعازل، بينما الأنواع الأخرى من السيراميك والتي تتمتع بمقدار سماحية أكبر يستعمل في المكثفات، والجدول المرفق يبين خصائص كل من السيراميك ذو السماحية القليلة والنوع الآخر من السيراميك وهو السيراميك ذو السماحية العالية.

جدول (4 – 2) خصائص السيراميك ذو السماحية القليلة:

الخاصية	بورسلان الجهد العالي	بورسلان الجهد المنخفض	الألومينا
امتصاص الماء (جزء بالمليون)	0	0.5 – 2	0
درجة الحرارة (C)	1000	900	1600
شدة العزل (KV/mm)	25	3	16
السماحية النسبية	5 – 7	5 – 7	9
زاوية الفقد $\tan \delta * 10^4$	50 - 100	100 – 200	5

جدول (5 – 2) خصائص السيراميك ذو السماحية العالية:

السيراميك	السماحية النسبية	زاوية الفقد $\tan \delta * 10^4$
أكسيد التيتانيوم	90	5
تيتانيت الكالسيوم	150	3
تيتانيت الباريوم	1500	150

(6 – 15 – 2) الألياف:

في بعض التطبيقات يتم استخدام الألياف لأغراض العزل الكهربائي، والسبب يعود إلى جودة خواصها الميكانيكية، حيث أنها تتمتع بمرونة عالية ونعومة الملمس ومدة استخدام طويلة، وتنقسم الألياف من حيث المصدر إلى قسمين. إما طبيعي مثل الحرير، الصوف، القطن والكتان، أو صناعية مثل الألياف. الزجاج، النايلون والتفلون. وتعتتمد الخصائص الكهربائية للألياف على درجة الحرارة ونسبة الرطوبة، وبوجود الشوائب الأيونية مثل الأملاح تقلل كثيراً من مقاومة الألياف الكهربائية ولكن جميع الألياف الجافة تماماً يتراوح مقدار ثابت العزل مابين 3 إلى 8. والجدول (6 – 2) يبين خصائص كل نوع من الألياف.

جدول (6 – 2) الخصائص الكهربائية للعازل:

الألياف	الكثافة	السماحية النسبية	زاوية الفقد $\tan \delta$
الألياف النباتية (طبيعية)			
القطن	1.5	4.5 – 7.3	0.12
الكتان	1.5	4.5 – 7.3	0.12
الجوت (القنب)	1.5	4.5 – 7.3	0.12
الألياف الحيوانية			
الصوف	1.3	1.5	0.016
الحرير	1.3	3.4 – 4.4	0.016
الألياف الاصطناعية			
نايلون	1.14	2.51	0.053
تريلين	1.38	1.97	0.030
التفلون	2.3	1.9 – 2.2	0.001 – 0.003
ألياف زجاجية	2.54	5.7	0.001 – 0.0025

(7 – 15 – 2) المواد العازلة المصنوعة من اللدائن:

في الآونة الأخيرة أصبحت اللدائن تستخدم في معظم التطبيقات. وفي معظم الصناعات وأصبحت بديلاً جيداً لكثير من المواد الطبيعية والصناعية، وفي عمليات العزل الكهربائي أصبحت تستخدم على نطاق واسع، وذلك يعود لخصائصه الممتازة. وقد حلت البديل الأمثل كغلاف لكوابل التوزيع وجميع أنواع الكوابل، وحلّت أيضاً مكان المواد المستخدمة في القواطع الكهربائية والمحولات كعوازل للملفات، وتستخدم في بعض الأحيان كعوازل لخطوط النقل الهوائية والكثير من التطبيقات التي يصعب حصرها. وتختلف هذه العوازل المصنعة من اللدائن باختلاف خواصها الكهربائية والحرارية. كما أنها تتميز بإمكانية إضافة الملونات والمواد المضادة للأكسدة والحشوات.

نظراً لتعدد أنواع اللدائن واختلاف خصائصها وطرق تصنيعها فقد جرى تصنيفها إلى عدة أصناف لتمييزها عن العوازل الصلبة الأخرى. تصنف اللدائن إلى ثلاثة أنواع، ثرموبلاستك وتكون الروابط بين جزيئاته متوازية ويمكن إعادة تدويره وتصنيعه بالحرارة مثل البولي إيثيلين والبولي فينيل كلورايد، أما النوع الثاني فهو الثرموسيتينغ وتكون الروابط بين الجزيئات متشابكة. وتتكون المادة بالتفاعل بين المركب الأساسي والمحفز للتفاعل بخلطهم بنسب معينة بحيث تبدأ الروابط في التشابك حتى تتصلد المادة، ويكون التفاعل طارد للحرارة، ومثال على ذلك مادة الإيبوكسي ون حيث يمكن أن تأخذ المادة شكل القالب بعد انتهاء التفاعل. وعندما تسخن المادة فإن درجة الحرارة لا تكون كافية لتكسير الروابط وتسييلها كما في حالة الثرموبلاستك، لذلك فهذا النوع غير قابل للذوبان أو الصهر. يمكن تحويل بعض المواد الثرموبلاستيكية إلى مواد ثيرموسيتينغ بإضافة بعض المواد الكيميائية أو الإشعاعات لتكوين روابط مشتركة. مثل البولي إيثلينين

المتشعب المستخدم في صناعة عوازل وأغلفة الكابلات وخاصة التي تعمل عند جهود عالية. والنوع الثالث هو مركبات المطاط.

(8 – 15 – 2) الثرموبلاستيك:

إن البلاستيك يتم من خلاله إنتاج العديد من المواد التي تستخدم في العزل الكهربائي ونذكر منها أهم المواد التي تستخدم في العزل الكهربائي:

أ. البولي إثيلين:

هي مواد ثيرموبلاستيكية لها خصائص فريدة مثل المقاومة العالية للرطوبة والكيماويات وهي سهلة الإنتاج ومنخفضة التكاليف، وكذلك لها مقاومة نوعية عالية وخصائص عزل ممتازة عند الترددات العالية.

لذلك تستخدم بكثرة في كابلات القوى والاتصالات وكابلات التحكم وكابلات التليفزيون. وبتغيير طريقة التصنيع يمكن عمل أنواع مختلفة من البولي إيثيلين لها كثافة مختلفة. وذلك لاستخدامها في مختلف التطبيقات. تتكون لدائن البولي إيثيلين من سلسلة متكررة من $-CH_2-CH_2-$ ويوجد منه البولي إيثيلين المنخفض الكثافة، والبولي إيثيلين عالي الكثافة، والبولي إيثيلين ذو الكثافة المنخفضة جداً، والبولي إيثيلين متوسط الكثافة، والبولي إيثيلين الخطي المنخفض الكثافة. ويستخدم البولي إيثيلين المتوسط الكثافة والبولي إيثيلين المنخفض الكثافة في صناعة أغلفة الكابلات بينما يستخدم البولي إيثيلين منخفض الكثافة في عوازل الكابلات والغلاف الخارجي. وحيث إن درجة ذوبان البولي إيثيلين المنخفض الكثافة هي ما بين 110 إلى $115^{\circ}C$ وتطري المادة عند درجة حرارة ما بين 80 إلى $90^{\circ}C$ لذلك فإن درجة الحرارة القصوى التي يجب ان يعمل عندها الكابل حددت بدرجة قدرها $70^{\circ}C$. ولزيادة درجة تحمل البولي إيثيلين للحرارة فقد طورت

عملية البلمرة بإضافة مواد كيميائية أو أشعة لتكوين بولي إيثيلين ذو روابط متشابكة Cross linked polyethelyn (XLPE) والذي يمكنه أن يعمل عند درجة حرارة مستمرة قصوى قدرها $90^{o}C$. والجدول المرفق يوضح القيم والخصائص الكهربائية لمادة البولي إيثيلين.

جدول (7 – 2) الخصائص الكهربائية للبولي إيثيلين:

الخاصية	بولي إيثيلين ذو كثافة منخفضة	بولي إيثيلين ذو كثافة متوسطة	بولي إيثيلين ذو كثافة عالية	بولي إيثيلين مشع
شدة العزل KV/cm	170 – 280	200 – 280	180 – 240	100 –1000
ثابت العزل $50h_z$ – 1MHz	2.3	2.3	2.35	2.3
المقاومة الحجمية Ω.cm	أعلى من 10^{16}	أعلى من 10^{16}	أعلى من 10^{16}	أعلى من 10^{16}
زاوية الفقد tan δ	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
مقاومة الشرارة	Melts	Melts	melts	melts

ب. النايلون:

النايلون عبارة عن ثيرموبلاستيك له قوة شد ومتانة ومرونة عالية عند نطاق درجات حرارة تتراوح بين 0 حتى 300 درجة مئوية، ولها كذلك شدة عزل عالية ومقاومية نوعية حجمية وسطحية جيدة حتى بعد تعرضها لمدة طويلة من الرطوبة. وكذلك يقاوم التفاعلات الكيميائية ومن السهل تصنيعه. ويستخدم في التطبيقات التي تحتاج إلى مادة تقاوم الخدوش والتآكل وقوية، وعادة ما يستخدم كطبقة علوية لغلاف الكابل. وذلك لمقاومتها العالية للتآكل أثناء جر وسحب الكوابل.

ج. البولي فينيل كلورايد:

يتميز البولي فينيل كلورايد بخواص كهربائية ممتازة عند الجهود المنخفضة، وكذلك درجات الحرارة المنخفضة، وهو يستعمل كعازل جيد في الكابلات حتى جهد 6 كيلو فولت، إلا انه يصبح غير مناسب للجهود الأكبر من ذلك، حيث ترتفع مفقودات العزل لسبب ارتفاع قيمة ثابت العزل، ومن الملاحظ أيضاً أن مقاومية البولي فينيل كلورايد تتغير تغيراً كبيراً مع درجة الحرارة مما يجعله عند درجة حرارة مرتفعة غير مناسب نهائياً حيث تهبط مقاومية العزل عند 70درجة مئوية إلى ألف مرة من قيمتها عند 20 درجة مئوية. علاوة على ذلك فإنه يلين بالحرارة ويصلد بالبرودة ولهذا لا يجب أن يتعرض لدرجات حرارة مستمرة تزيد عن 70درجة مئوية أو تقل عن 0 درجة مئوية.

وقد أمكن في السنوات الأخيرة إنتاج أنواع أخرى من البولي فينيل كلوريد (كلوريد الفينيل المتعدد) بهدف تحسين خواصها الكهربائية والحرارية. وقد أمكن زيادة مقاومة هذه المادة للاحتراق بإضافة مادة هيدرات ثلاثي الألومونيوم Aluminum trihydrate والفوسفات والملدنات الهالوجينية. كما تم تقليل نسبة تركيز كلوريد الهيدروجين المنبعث أثناء الاحتراق بإضافة مسحوق كربونات الكالسيوم. أما كثافة الدخان المتولد فيمكن تقليلها باستخدام بعض الأملاح المعدنية.

د. البولي سترين:

هو أحد أصناف البلاستيك وتتميز بمقاومة عزل عالية جداً، حيث أن شدة العزل للبولي سترين تقارب شدة عزل الميكا، وشدة العزل هذه لا تعتمد على التردد. والجدول (8 – 2) المرفق يبين الخصائص الكهربائية لمادة البولي سترين.

جدول (8 – 2) خصائص البولي سترين الكهربائية:

الخاصية المقاومة الحجمية 0m.cm	القيمة $10 * 10^{19}$
زاوية الفقد $\tan \delta$	0.0002
ثابت العزل	2.55
شدة العزل KV/cm	200 – 350

والبولي سترين يستخدم عادة على شكل رقائق في تصنيع مكثفات القليلة الفقد والتي لها سعة ثابتة.

ه. الأكريليك:

والأكريليك هو عبارة عن مادة شفافة مقاومة للأشعة فوق البنفسجية وقوية ومقاومة للانشطار. تستخدم في اللوحات المضيئة بكثرة كاللوحات الإعلانية.

و. البوليكاربونات:

ويتميز بقوته وهو عازل شفاف وله خواص كهربائية جيدة ويستخدم بكثرة في صناعة أغطية وحدات إنارة الشوارع.

ز. البولي بروبلين:

يستخدم في عزل المكثفات الكهربائية والكابلات.

ح. التفلون:

وهو من العوازل المتميزة والمقاومة للتآكل ولها معامل احتكاك منخفض، كما تتميز بصلادتها ويمكن أن تستخدم عند درجة حرارة 250 درجة مئوية باستمرار. ولذلك لا يعتبر من ضمن مواد الثيرموبلاستيك الحقيقية نظراً لعدم إمكانية إستخدامه بثقة، حيث يشكل على العازل بضغطه عند درجة حرارة منخفضة مما يجعل الجزيئات تلتحم ببعضها. قصر استخدام هذه المادة في الكابلات التي تتعرض لدرجات حرارة عالية وتردد عالي وذلك نظراً لتكلفة التصنيع العالية.

ط. البولي يوريثين:

يستخدم البولي يوريثين في تصنيع طبقة ما فوق غلاف الكابلات لحمايته وذلك لتميزه بمقاومة الاحتكاك.

ي. الثيرموسيتينغ:

ويوجد العديد من أنواع البلاستيك التي تخضع لهذا التصنيف ومن أشهرها استخداماً في أغراض العزل المواد التالية:

1) البوليستر:

البوليستر له خصائص عزل ممتازة وصلابة سطح ومقاومة عالية لمعظم الكيماويات ويمكن تصنيف البوليستر إلى نوعين هما النوع المشبع والنوع

غير المشبع. البوليستر المشبع يستخدم في الشرائح الزجاجية وألياف الزجاج المقوى. ألياف البوليستر تستخدم في عمل الورق وملابس التطبيقات الكهربائية، ورقائق البوليستر تستخدم في عزل الأسلاك والكابلات في المحركات والمكثفات والمحولات. رقائق بوليستر مايلور يستخدم بكثرة لعمل العازل الورقي، حيث إنه عند تردد القوى يكون عامل الفقد منخفض جداً يقل بزيادة درجة الحرارة. كذلك له شدة عزل حوالي $2,000$ كيلوفولت/سم ومقاومية حجمية أفضل من 10^{15} أوم.سم عند 100 درجة مئوية.

ب) الإيبوكسي:

وهو من العوازل الجيدة وله استخدامات عديدة كعوازل كهربائية، بالإضافة إلى مقاومتها للقلويات وقوتها. وتستخدم في صناعة العناصر الالكترونية وبعض الاستخدامات الأخرى في عوازل الجهد العالي.

ج) الفينولات:

وهي من المواد العازلة القوية ولكنها قابلة للكسر، وتتميز بجودة عزلها الكهربائي، حيث تستخدم حتى درجة حرارة قدرها 150 درجة مئوية. وتستخدم في عوازل الجهد العالي كرقائق من هذه المادة والورق، وكذلك تستخدم في الأفياش والمقابس الكهربائية.

(9 – 15 – 2) مركبات المطاط:

ويوجد العديد من أنواع المطاط التي تخضع لهذا التصنيف. يوجد نوعان من المطاط: طبيعي وصناعي، وتعتمد الخصائص الكهربائية للمطاط على درجة التصلد ودرجة المزج.

العوامل المؤثرة على الخصائص الكهربائية للمطاط هي: الشوائب، والتغيرات الكيميائية والرطوبة والتغيرات في درجة الحرارة والتردد. يعتبر مطاط البتيل من أشهر أنواع المطاط الصناعي وقد استخدم على نطاق واسع في صناعة كابلات السفن، نظراً لمقاومته للزيوت والشحوم التي تكون موجودة عادة داخل السفن. ومن أشهرها استخداماً في أغراض العزل المواد التالية: المطاط الطبيعي، الاستيرين بوتادين، البوتادين، الثيرموبلاستيك، البيتيل، الإيثيلين بروبلين، والإيثيلين بروبلين.



3

الصواعق

الفصل الثالث

الصواعق

(3 – 1) مقدمة:

إن ظاهرة الصواعق الكهربائية هي ظاهرة طبيعية، لا تعتمد قيمة الجهد للصاعقة التي تظهر على الخطوط الكهربائية على تصميم الخط بعكس الجهد الذي ينشأ عند فصل أو توصيل دائرة كهربائية، فإن أداء الصاعقة يميل إلى التحسن بزيادة مستوى العزل، وبما أن ضمان استمرارية الخدمة لمصادر الطاقة الكهربائية وتوثيقها يعتمد على تقليل عدد مرات الخروج الاضطراري للوحدات في الشبكات الكهربائية. لذا من الواجب أخذ الاحتياطات وتوجيه عناية خاصة لحماية الخطوط الكهربائية والمعدات الكهربائية بالشبكة من حدوث زيادة مفاجئة للجهد الكهربائي في نظم القوى الكهربائية جرّاء عوامل وظروف خارجية. مثل الصواعق الكهربائية.

(3 – 2) الأسباب الطبيعية لحدوث ظاهرة الصواعق (البرق):

تعتبر ظاهرة الصواعق الكهربائية هي تفريغ كبير للشحنات المتراكمة في السحب إلى سحابة مجاورة أو إلى الأرض. وفي هذه الحالة فإن المسافة بين الأقطاب الكهربائية، وهي المسافة بين السحابة والأخرى أو المسافة بين السحابة والأرض، تكون كبيرة جداً قد تصل إلى 10 كيلو مترات أو ربما أكثر.

إن آلية تكون الشحنات داخل السحب وتفريغها هي عملية معقدة جداً.

(3 – 3) تأثيرات البرق:

إن للبرق تأثيرات على جميع المواد التي يسري فيها تيار البرق. والآثار التي يتركها التيار البرقي تعتمد على شدة التيار المار بها، ويمكن حصر تأثيرات البرق في ما يلي:

1. التأثير على الإنسان والحيوان:

إن الخطر الأكبر من البرق عند تلامس الإنسان أو الحيوان مع جسم يسري به تيار البرق. ويمكن أن يمتد خطر تيار البرق لمسافة قد تتجاوز مسافة 300متر، وعادةً ما تكون الحيوانات أكثر عرضة للخطر من الإنسان على وجه الخصوص، وذلك لأن النسبة الأكبر من البرق تحدث في الخلاء، وإن ما معدله 40% من الإصابات بالبرق هي إصابات مميتة.

2. التأثير الحراري:

حيث أنه عند مرور تيار البرق في المواد الموصلة ترتفع درجة حرارتها كثيراً، وعندئذ تسخن الكوابل الرفيعة بحيث يمكن أن يشتعل العازل المحيط بتلك الكوابل أو اشتعال المواد المجاورة القابلة للاشتعال، وإن مقدار التيار الناجم عن دخول البرق يمكنه أن يؤدي إلى انصهار بضع ميليمترات من معدن الموصل، وهذا يعني أنه يجب علينا أن نأخذ بعين الاعتبار الأماكن المعرضة لخطر الانفجار. ومن التطبيقات التي تؤدي أيضاً إلى الانفجار عند مرور تيار البرق من خلال موصل رطب بحيث يتبخر السائل بشكل سريع ومفاجئ مما يؤدي إلى انفجار في الجدران أو حتى الأعمدة الخشبية.

3. التأثير الكهروكيميائي:

إن تيار البرق ذو مقدرة على أن يحلل كمية من المعدن، وفي الواقع إن هذه الكمية لا تتجاوز البعض ميليغرامات على الأكثر.

4. التأثير الكهروديناميكي:

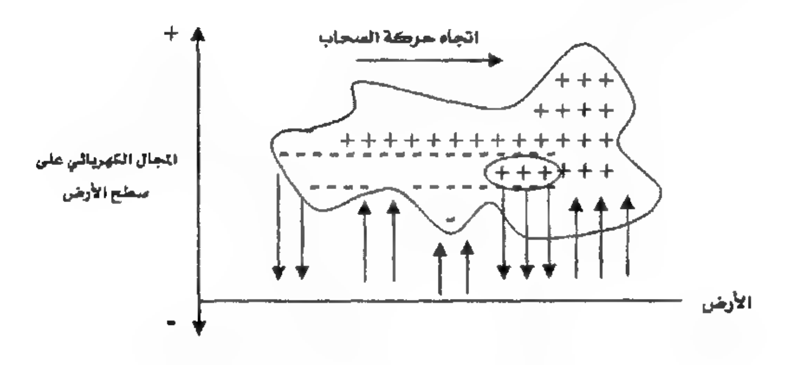
عند تدفق تيار البرق في موصلات متوازية قريبة من بعضها (كما هو الحال في شبكات نقل القدرة الكهربائية) تظهر قوى كهروديناميكية بينها يمكن أن تصل إلى 100KN/m، وهذه القوى الكهروديناميكية يمكنها أن تحطم جزءاً كبيراً من المنشآت الكهربائية.

(4 – 3) تكون الشحنات الكهربائية في السحب:

العوامل التي تشترك في تكوين أو تراكم الشحنات الكهربائية في السحب كثيرة وغير محددة، لكن أثناء العواصف الرعدية تنفصل الشحنات الكهربائية السالبة والموجبة بالتيارات الهوائية العنيفة التي تؤدي إلى دفع البلورات الثلجية للأجزاء العليا للسحابة والأمطار إلى الجزء السفلي للسحابة. هذا الفصل للشحنات يعتمد على ارتفاع السحب والذي يتراوح بين 200m إلى 10km مع احتمالية تركز الشحنات على مسافة تتراوح بين 300m إلى 2km، وحجم السحب التي تشترك في تفريغ الصواعق الكهربائية للأرض غير محددة لكن الشحنات الكهربائية داخل السحابة يمكن أن تصل إلى 100كولوم. لذلك فالسحب في هذه الحالة يمكن أن يكون جهدها الكهربائي يتراوح بين $10^8V - 10^7$ مع مجال كهربائي يتراوح بين 100V/m داخل السحابة إلى 10KV/m عند نقطة التفريغ الابتدائية.

وتصل قيمة الطاقة الكهربائية المصاحبة لعمليات التفريغ إلى حوالي 250 كيلوووات/ ساعة. وتكون المنطقة العليا من السحابة دائماً موجبة الشحنة بينما المنطقة السفلى وقاعدة السحابة تهيمن عليها الشحنات السالبة ما عدا المنطقة الموضعية – بالقرب من القاعدة والرأس للسحابة – والتي تكون موجبة الشحنة. ويمكن أن تصل أقصى قيمة للمجال الكهربائي على الأرض الناتجة عن السحب المشحونة إلى 300V/cm بينما هذه القيمة تكون حوالي 1V/cm في الأجواء الصحوة.

ويتم تمثيل التوزيع المحتمل لتوزيع الشحنات في السحابة في الشكل (1 – 3) المبين أدناه.

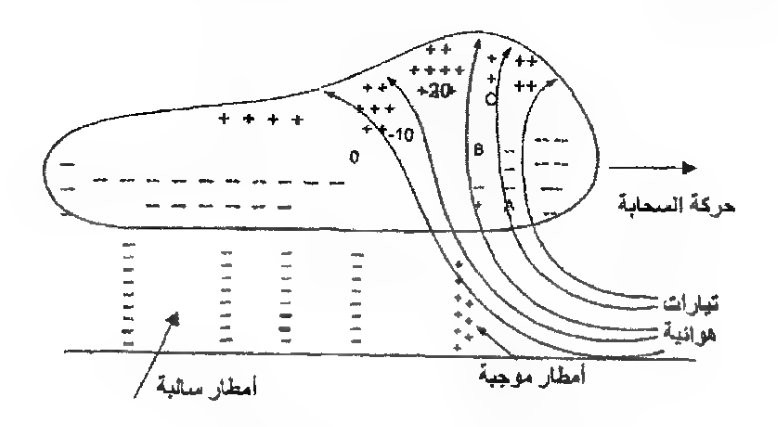


شكل (1-3) التوزيع المحتمل لتوزيع الشحنات في السحابة

طبقاً لنظرية سمبسون فإن هناك ثلاث مناطق هامة في السحابة لا بد من أخذها في الاعتبار عند تكوين الشحنات، في الشكل الموضح أدناه أسفل المنطقة A تكون سرعة التيارات الهوائية حوالي 800cm/s ولا يوجد تساقط للمطر خلالها. وفي المنطقة A تكون سرعة التيارات الهوائية كافية لتفتيت قطرات الماء المتساقطة، مسببة شحنات موجبة كثيفة في السحابة وشحنات سالبة في الهواء. فالشحنات الموجبة تسحب السحابة لأعلى، والتي تقل بها

سرعة الهواء، وتتحد القطرات المائية المشحونة بالشحنات الموجبة مرة أخرى مع القطرات الأكبر لتسقط مرة أخرى. لذلك فإن المنطقة A تصبح مليئة بالشحنات الموجبة بينما المنطقة B أعلى المنطقة A تصبح سالبة الشحنة بالتيارات الهوائية. وفي المنطقة العليا للسحابة تكون درجة الحرارة منخفضة (أقل من درجة التجمد) وتكون البلورات الثلجية هي المتواجدة فقط. وضغط الهواء على هذه البلورات الثلجية يجعلها سالبة الشحنة.

وقد قدم رينولد وماسون تعديلاً لهذه النظرية طبقاً للحقيقة القائلة بأن ارتفاع السحب الرعدية عن الأرض يمكن أن يتراوح بين 12 إلى 14 كيلومتر. التيارات الهوائية والرطوبة ودرجة الحرارة النوعية من العوامل الهامة لتكون السحب الرعدية وتكون الشحنات الكهربائية.



شكل (2-3) نموذج السحابة حسب نظرية سمبسون

تتحرك التيارات الهوائية –التي تتحكم بها التغيرات في درجة الحرارة– لأعلى محملة بالرطوبة وقطرات الماء. تكون درجة الحرارة صفر درجة مئوية عند ارتفاع 4 كيلومتر من الأرض وربما تصل إلى 50درجة مئوية تحت الصفر عند ارتفاع حوالي 12كيلو متر، ولا تتجمد قطرات الماء حالاً عندما تصل

درجة الحرارة للصفر، لكنها تتجمد عند درجة حرارة 40 درجة مئوية تحت الصفر فقط كجزيئات صلبة وعلى هذه الجزيئات تتكون البلورات الثلجية وتنمو وتتضاعف. وكلما زاد عدد الأماكن الصلبة تزداد معها درجة الحرارة التي تتكون وتتضاعف عندها البلورات الثلجية لذلك ففي السحب تتراوح درجة حرارة التجمد الفعالة بين 33 و40 درجة مئوية تحت الصفر. في السحب الرعدية تجذب التيارات الهوائية القطرات المائية لأعلى وتتعرض هذه القطرات لتبريد عالٍ جداً. وعندما يحدث هذا التجمد تنمو البلورات الثلجية وتتكاثر وتبدأ في الحركة لأسفل تحت تأثير وزنها وقوة الجذب. لذلك فالسحب الرعدية تتكون من قطرات مائية مبردة تبريد عالٍ تتحرك لأعلى ومن البرد تتحرك لأسفل.

وعندما تؤثر القطرات المائية المبردة تبريداً عالياً على كتل البرد تتجمد تجمداً جزئياً أي أن الطبقات الخارجية لقطرات الماء تتجمد مكونة طبقة بداخلها ماء. وعندما تمتد خطوات التبريد للمنطقة الدافئة في قلب القطرات تتمدد ولهذا السبب تتحول إلى قطع صغيرة متناثرة من الثلج، وتتحرك لأعلى بفعل التيارات الدوامية وتحمل شحنات موجبة للمنطقة العليا من السحابة. وتتحرك كتل البرد لأسفل محملة الشحنات السالبة المكافئة للمنطقة السفلى من السحابة ولذلك تتكون الشحنات السالبة في الجانب الأسفل للسحابة.

طبقاً لماسون فإن قطرات الثلج لا بد أن تحمل فقط الشحنات الموجبة لأعلى ولكون الماء أيوني بطبيعته وله تركيز من أيونات (H^+) الهيدروجين الموجبة وأيونات (OH^-) أكسيد الهيدروجين السالبة.

وتعتمد كثافة الأيونات على درجة الحرارة لذلك فإن كتلة الثلج التي تكون درجة حرارة السطح العلوي لها T_1 ودرجة حرارة السطح السفلي لها T_2 بحيث ان $(T_1<T_2)$ يكون التركيز الأعلى للأيونات في المنطقة السفلى. وبما أن أيونات الهيدروجين الموجبة أخف وزناً فإنها تتسرب بسرعة إلى جميع الحجم. لذلك فإن المنطقة السفلى والتي تكون دافئة تتحمل بالأيونات السالبة والمنطقة العليا – المنطقة الباردة – تتحمل بالأيونات الموجبة. لذلك فإن الطبقات الخارجية لقطرات الماء المجمدة والتي تلمس كتل البرد تكون أبرد نسبياً (من قلب القطرات الداخلية والتي بها ماء أدفأ) ولذلك تكتسب شحنات موجبة وعندما تتشقق الطبقات الخارجية وتجزأ فإن الشحنات الموجبة تتجه لأعلى السحابة.

وطبقاً لنظرية رينولد والتي تعتمد على النتائج العملية فإن جزيئات البرد تكتسب شحنات سالبة عندما تلمس بلورات الثلج الدافئة وعند انعكاس الحالات الحرارية تنعكس قطبية الشحنات. وبزيادة الشحنات أي بزيادة معدل تولد الشحنات وجد أنه لا يتفق مع الملاحظات العملية المتعلقة بالسحب الرعدية.

(5 – 3) معدل شحن السحب الرعدية:

اعتبر ماسون أن السحب الرعدية تتكون من خليط منتظم من الشحنات الموجبة والسالبة. ومن خلال كتل البرد والتيارات الدوامية تنفصل الشحنات رأسياً. بفرض أن λ هو العامل الذي يعتمد على موصلية الوسط، سيكون هناك طريق مقاومي متسرب للشحنات من المجال الكهربائي وهذا يجب أخذه في الاعتبار لشحن السحب.

وإذا افترضنا بأن E هي عبارة عن كثافة المجال الكهربائي.

v سرعة فصل الشحنات.

ρ كثافة الشحنات في السحابة.

فإن المجال الكهربائي E يمكن إيجاده من خلال:

$$\frac{dE}{dt} + \lambda E = \rho v \text{ .... (1)}$$

$$E = \frac{\rho v}{\lambda} [1 - \exp (1 - \lambda)] \text{ .... (2)}$$

ومن خلال هذه المعادلة نفترض مبدئياً بأن $E = 0$ عند $t = 0$.

ويفرض أن Q_s هي الشحنات المنفصلة وQ_g هي الشحنات المتولدة لذلك فإنه:

$$\rho = Q_g / A_h \text{ .... (3)}$$

$$E = Q_s / A_{\varepsilon o} \text{ ...... (4)}$$

حيث أن:

ε_o سماحية الوسط.

A مساحة السحابة.

h ارتفاع المنطقة المشحونة.

من المعادلة (2) وبالتعويض تجد أن:

$$Q_g = \frac{Q_s h}{v[1-\exp(-\lambda t)]} = \frac{M}{v[1-\exp(-\lambda t)]} \text{ .... (5)}$$

حيث أن $M = Q_s h$ وهو العزم الكهربائي للصاعقة الرعدية.

القيم المتوسطة الملاحظة للسحب الرعدية هي:

الثابت الزمني = $(\lambda/1)$ = 20 ثانية

العزم الكهربائي = M = 110 كولوم.كيلومتر

زمن ظهور اول وميض = t = 20ثانية

سرعة فصل الشحنات = v = 10 حتى 20 متر/ثانية.

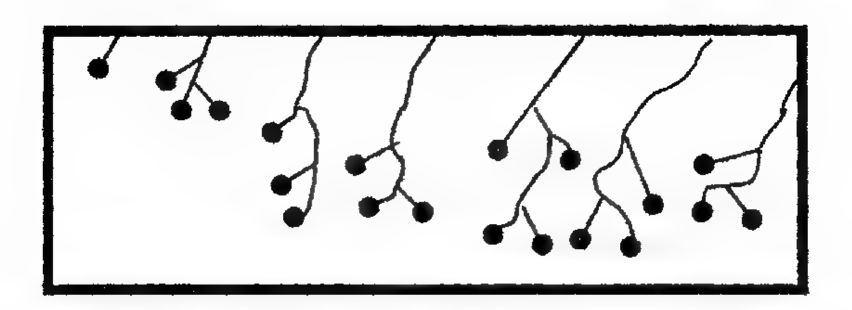
بالتعويض بهذه القيم نجد أن:

$$Q_s = \frac{20{,}000}{v} = \frac{20{,}000}{20} = 1000 \text{ coloumb for } v = 20 \text{ m/s}$$

(6 – 3) الية الصاعقة الرعدية:

عند تجاوز كثافة المجالات الكهربائية في بعض النقاط في السحابة المشبعة بالشحنات الكهربائية فإن مجرى كهربائي مليئاً بالشحنات يتحرك متجهاً للأرض بسرعة كبيرة. وفي بعض الحالات يتقدم لمسافة بسيطة لا تتجاوز 100متر قبل أن يتوقف مشعاً وميض لامع من الضوء القريب إلى اللون الأزرق، وهذا التوقف ربما يكون سببه عدم كفاية الشحنات الكهربائية عند بداية (رأس) المجرى الكهربائي لذا فهو غير كافٍ للحفاظ على المجال الكهربائي الضروري للتقدم لمسافة أكبر من ذلك للمجرى الكهربائي. ويتكرر هذا الحدث بعد مدة زمنية صغيرة يبدأ مرة أخرى مكرراً إنجازه. حيث أن الوقت المطلوب لهذا المجرى الكهربائي للوصول إلى الأرض في حدود نصف ثانية، حيث أن قيمة المجالات الكهربائية لانهيار الهواء المتأين الرطب

$\approx 10KV/cm$. إن بريق المجرى الكهربائي يعتمد على بعض العوامل أهمها حالة الهواء المحيط والمجالات الكهربائية. وفي بعض الحالات تتكون أفرع من المجرى الكهربائي الابتدائي، ويكون هذا التقدم للمجرى الكهربائي من خلال قفزات متتالية تسمى خطوات قيادية، كما هو موضح في الشكل (3 – 3).

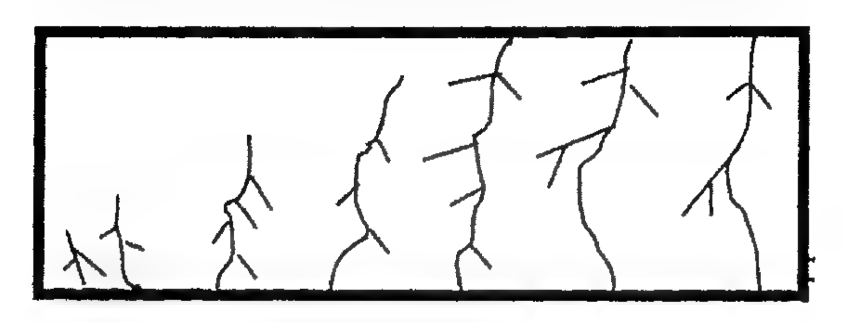


الشكل (3 – 3) كيفية تقدم الخطوات القيادية

وعند وصول المجرى الكهربائي للأرض يتبع ذلك مباشرة الصاعقة العائدة، حيث يتحرك المجرى الكهربائي للأرض لتتراكم الشحنات الموجبة أسفل الصاعقة أو المجرى، وفي نفس الوقت تكون قد وصلت الصاعقة أو اقتربت كثيراً من الأرض، ومن خلال الكثافة العالية للمجالات الكهربائية يتكون المجرى، فعندئذٍ تعاد الشحنات الكهربائية الموجبة للسحابة لتعادل الشحنات الكهربائية السالبة وعندئذٍ يمر تيار عالي من خلال هذا المجرى. وتبلغ سرعة الصاعقة ما بين 0.5 – 0.05 من سرعة الضوء. أما شدة التيار فتتراوح ما بين 250 KA – 1 وعادةً ما تنتهي الصاعقة المعادة قبل الوصول إلى السحابة. وتبلغ فترة استمرارية الصاعقة 0.1 ثانية أو تزيد حسب الظروف المحيطة بها.

وبعد انتهاء مدة الصاعقة المعتادة يتبقى تيار صغير تتراوح شدته من 1000A – 100 لفترة زمنية قد تصل إلى 50ms حيث تتسبب هذه التيارات بخفض نقاط الانهيار الابتدائية في السحابة وتتركز التفريغات حول هذه

النقطة، ونتيجة لذلك تصبح هناك خزانات إضافية للشحنات متاحة بسبب اختراق كتلة السحابة والمعروفة بالطرق المفضلة، والتي تقود إلى الصواعق المكررة الصاعقة القيادية للصواعق المكررة، تتقدم بسرعة تقريبية تبلغ 1% من سرعة الضوء ولا تتفرع. وتسمى هذه الصاعقة القائد المستمر والصاعقة المعادة لهذه الصاعقة تتبع دائماً بتيار أقل. والشكل (4 – 3) يوضح ذلك.



الشكل (4 – 3) الصاعقة المعادة

المدة الزمنية التي تفصل الصواعق المكررة عن بعضها البعض بمتوسط زمني يبلغ 30 ميلي ثانية، أما الزمن الكلي للصاعقة فمن الممكن أن يتجاوز الثانية الواحدة.

(1 – 6 – 3) متغيرات وخصائص الصواعق:

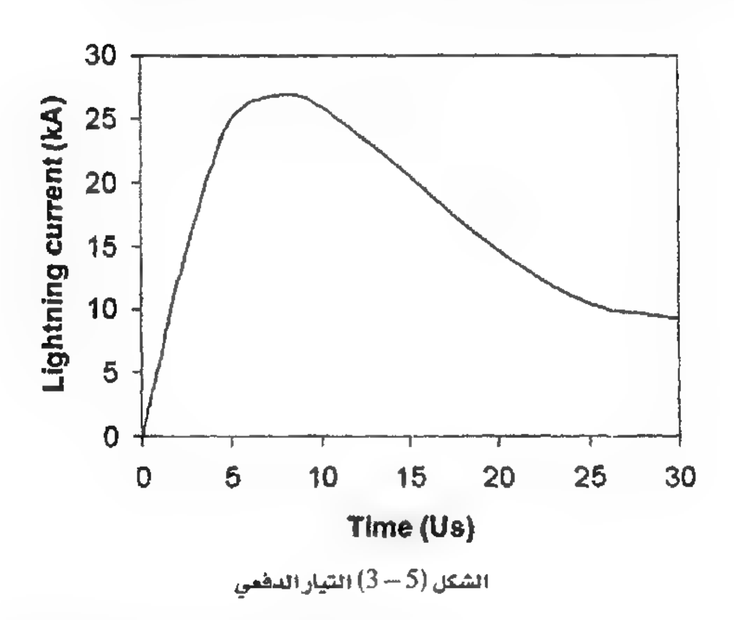
إن متغيرات وخصائص الصواعق تتضمن المعطيات التالية:

أ. قيمة التيار.

ب. معدل ارتفاع التيار والتوزيع المحتمل لها.

ج. شكل الموجة بجهود وتيارات الصواعق.

وموجـة التيـار للموجـات الدفعيـة للصـاعقة علـى خطـوط النقـل الكهربائي موضحة من خلال الشكل (5 – 3) حيث يبين لنا بأن التيـار الدفعي يـزداد في زمـن قصـير جـداً إلى أقصـى قيمـى لـه (10 مايكروثانيـة) ثـم يقـل تدريجياً إلى أن يبلغ الصفر في مدة زمنية أطول نسبياً. حيث تسمى الموجة التي يرتفع فيها التيار ليصل إلى القيمة القصوى بالموجة الأمامية. أما الموجة التي ينخفض فيها التيار بشكل تدريجي ليصل إلى الصفر فيطلق عليها اسم موجة الذيل. وتأخذ هذه الموجة مدة زمنية أطول لتبلغ مدة مللي ثانية.



الشكل (5 – 3) التيار الدفعي

حيـث أن هـذه الموجـة هـي المسؤولة عـن انهيـار المعدات الكهربائيـة مـن خلال ما يسمى بالانهيار الحراري. وعادةً يتم قياس شدة التيار الدفعي مباشـرةً من المباني الشاهقة أو الأبراج أو عند أرجل أبراج خطوط النقل.

ومن الخصائص الهامة الأخرى هي زمن القيمة القصوى ومعدل ارتفاع التيار ومن خلال المعلومات والبيانات التي تم جمعها من القياسات فإن ما نسبته 50% من التيارات الدفعية للصواعق لها معدل ارتفاع أكبر من 7.5KA/ms و10% اكبر من 25KA/ms.

والمقصود بزمن موجة الذيل هو الزمن اللازم لتبلغ نصف القيمة القصوى على موجة الذيل وهو عادةً يكون 30ms.

وإن جميع القياسات التي اجريت على الجهور الدفعية تشير إلى أن القيمة القصوى للجهد يمكن أن يبلغ $5*10^6$V على خطوط النقل الكهربائية ولكن في المتوسط تكون الجهود الدفعية للصواعق لا تتجاوز 1000KV على الخطوط وزمن الموجة الأمامية يتراوح بين 10ms – 2 وزمن الذيل يتراوح ما بين 20–100ms ومعدل ارتفاع الجهد الدفعي في حدود 1MV/ms.

الصواعق الرعدية على خطوط النقل تنقسم إلى مجموعتين الصواعق المباشرة والصواعق التأثيرية. عندما تفرغ السحابة الرعدية مباشرةً على أبراج خطوط النقل أو على موصلات الخط الكهربائي تسمى بالصواعق المباشرة، وهذه هي أخطر الصواعق على المعدات الكهربائية ولكنها نادرة الحدوث. ولكن في معظم الأحوال تحدث الصواعق التأثيرية.

عندما تولد العواصف الرعدية الشحنات السالبة عند الطرف الأرضي، تطور الأجهزة المؤرضة شحنات موجبة تأثيرية، والأجهزة المؤرضة التي يهتم بها تقنيو الكهرباء هي خطوط النقل والأبراج. ومن المتوقع أن خطوط النقل لا تتأثر لأنها معزولة عن الأرض بعوازل التعليق بينما تتسرب الشحنات الموجبة من البرج خلال عوازل التعليق إلى موصلات خطوط النقل بسبب المجال

الكهربائي العالي، وهذه العملية تأخذ وقتاً أكبر يقدر بمئات الثواني. وعند تفريغ السحابة لبعض المعدات المؤرضة يترك خط النقل محملاً بكمية كبيرة جداً من الشحنات الموجبة والتي لا يمكن تسريها فجأة. وهكذا يمثل خط النقل والأرض مكثفاً ضخماً جداً مشحون بالشحنات الموجبة وعندئذ يحدث الجهد الزائد من خلال هذه الشحنات التأثيرية وينتج عنها صاعقة كهربائية تسمى الصواعق الرعدية التاثيرية.

في بعض الأحيان عند حدوث الصواعق الرعدية المباشرة على البرج فإنه يحمل تياراً دفعياً عالياً جداً وهذا التيار الدفعي يبني جهداً دفعياً عالياً على البرج من خلال المقاومة الأرضية للبرج. وبذلك يمكن حدوث الشرارة السطحية على أسطح عوازل التعليق وهو ما يسمى "بالشرارة السطحية الخلفية".

(7 – 3) النموذج الرياضي للصاعقة:

اثناء عملية تكون الشحنات تعتبر السحابة غير موصلة ولهذا يمكن افتراض وجود جهود مختلفة عند الأجزاء المختلفة بالسحابة. ولو استمرت عملية تكون الشحنات الكهربائية بالسحب فمن المحتمل أن تزيد قيمة المجال الكهربائي عند بعض النقاط للمناطق المشحونة عن شدة العزل للهواء أو الهواء الرطب في السحابة. هذا التفريغ الموضعي يمكن أن يؤدي إلى تكون خزان كبير للشحنات داخل كتلة كبيرة من السحابة فوق الأرض مع وجود الهواء كعازل بين السحابة والأرض. وعند التفريغ بين السحابة والأرض بأول صاعقة قيادية والتي تتبعها الصواعق الرئيسية بكمية تيارات عالية؛ فمن الممكن اعتبار الصاعقة الرعدية كمصدر تيار قيمته I_0 مع معاوقة مصدر

قيمتها Z_0 وتفرغ تجاه الأرض. وبفرض أن الصاعقة ضربت كياناً أو معدة كهربائية له مقاومة Z فإن الجهد الذي يبنى على هذا الكيان يكون مساوياً:

$$V = IZ$$

$$= I_0 \frac{ZZ_0}{Z+Z_0}$$

$$= I_0 \frac{Z}{1+\frac{Z}{Z_0}} \quad \text{..........} \ (6)$$

ولغاية اللحظة لم يتم معرفة قيمة معاوقة المصدر لمجرى الصاعقة.

ولكنه بحسب الدراسات والبيانات المتوفرة يتراوح ما بين $1 - 3 \ K\Omega$ والعنصر الأهم في منظومة القدرة الكهربائية هو خطوط النقل الكهربائي حيث أن معاوقة الدفعية له تتراوح بين $300 - 500\Omega$، أما بالنسبة للكوابل الأرضية فهي تتراوح ما بين $100 - 150\Omega$ وللأبراج يين $10 - 50\Omega$. لذلك فإن قيمة Z/Z_0 تكون في الغالب أقل من 0.1 وهي قيمة صغيرة يمكن إهمالها. وحينها يكون مقدار ارتفاع الجهد بالخطوط يساوي:

$$V = I_0 Z$$

حيث أن:

I_0 هو تيار الصاعقة الرعدية.

Z هي معاوقة الدفعة الكهربائية للخط.

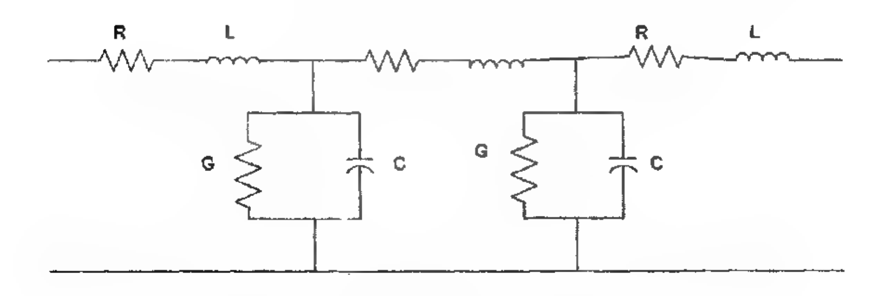
وإذا افترضنا بأن شدة تيار الصاعقة هو $10KA$ قد ضرب خط نقل هوائي معاوقته الدفعية 400Ω فإنه يتسبب في جهد زائد لحظي مقداره

4MV وهذا الجهد الكبير يتسبب في حدوث شرارة كهربائية على أسطح العوازل المستخدمة لتعليق الخط.

في حالة الصاعقة المباشرة على الخط الكهربائي الهوائي فإن موجة الخط تنقسم لجزئين وتسير كل موجة في اتجاه معاكس للأخرى، لذلك فالمعاوقة الدفعية الفعالة للخط الهوائي تبدو بالموجة الدفعية $Z_0/2$ وبأخذ المثال السابق يصبح الجهد اللحظي مقداره (400/2) × 10,000 اي 2,000 كيلوفولت. لو أن هذا الخط الهوائي جهده 132 كيلوفولت وعدد عوازل التعليق 11 عازل قطر كل منها 25.4 سم فإن الشرارة السطحية على عوازل التعليق ستحدث حيث أن جهد الشرارة للعوازل عند الجهد الدفعي حوالي 950 كيلوفولت لجهد دفعي زمن مقدمة موجته 2ميكروثانية.

(1 – 7 – 3) انتشار موجات الجهد والتيار الدفعي على خطوط النقل:

إن خطوط النقل الطويلة هي شبكة كهربائية بعناصر كهربائية موزعة. وباعتبار L الحث، C السعة، R المقاومة وG هي موصلية التسريب لكل وحدة طول من الخط كما هو موضح في الشكل (6 – 3).



شكل (6 – 3) يبين عناصر الخط الكهربائي الطويل

ومن التمثيل في الشكل (6 – 3) يمكننا كتابة موجات الجهد والتيار عند أي نقطة على مساحة X من نقطة انطلاق الموجة كما يلي:

$$\frac{\delta^2 e}{\delta x^2} = RG + (RC + GL)\frac{\delta e}{\delta t} + LG\frac{\delta^2 e}{\delta t^2} \quad \ldots\ldots\ldots (6)$$

$$\frac{\delta^2 i}{\delta x^2} = RG + (RC + GL)\frac{\delta i}{\delta t} + LC\frac{\delta^2 i}{\delta t^2} \quad \ldots\ldots\ldots (7)$$

ويمكننا حل المعادلتين (7 – 6) كما يلي:

$$e = [\exp(x\gamma)]f_1(t) + [\exp(-x\gamma)]f_2(t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

وكذلك فإن:

$$i = \sqrt{\frac{Y}{Z}}\,\{[\exp(x\gamma)]f_1(t) + [\exp(-x\gamma)]f_2(t)\} \quad \ldots\ldots\ldots (9)$$

حيث أن:

$$\gamma = \sqrt{LC}\,[(P + \frac{R}{L})(P + \frac{G}{C})]^{1/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

$$Y = G + C_P$$

$$Z = R + L_P$$

$$P = \delta/\delta t$$

وإذا اعتبرنا بأن الخط مثالي أي تم إهمال الفقد بحيث تكون $R = 0$ و $G = \infty$ فإن معادلات موجات التيار والجهد يتم تبسيطها لتصبح كالتالي:

$$\frac{\delta^2 e}{\delta x^2} = LC\,\frac{\delta^2 e}{\delta t^2} \;\ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

$$\frac{\delta^2 i}{\delta x^2} = LC\,\frac{\delta^2 i}{\delta t^2} \;\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

وبحل هاتين المعادلتين نستنتج أن:

$$e = f_1(t + \frac{x}{v}) + f_2(t - \frac{x}{v}) \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

$$i = -\sqrt{\frac{C}{L}}\, f_1(t + \frac{x}{v}) + \sqrt{\frac{C}{L}}\, f_2(t - \frac{x}{v}) \;\ldots.. (14)$$

وسرعة الموجة تبلغ:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \;\ldots\ldots\ldots (15)$$

ومقدار المعاوقة الدفعية للخط هي:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \;\ldots\ldots\ldots (16)$$

وهذا الحل بافتراض أن سرعة الضوء في وسط بدون أي فقد ويمثل الحل موجتين دفعيتين تسيران في اتجاهين متعاكسين.

عند تطبيق الجهد $e(t)$ عند أحد طرفي الخط الكهربائي غير الفاقد تشحن أول وحدة مكثف للجهد e وتفرغ بعد ذلك في المكثف الذي يليه من خلال الحث L وهذه العملية (الشحن/ التفريغ) تستمر حتى الطرف الآخر من الخط وتنتقل الطاقة من الشكل الكهروستاتيكي في المكثف للشكل المغناطيسي في الملف، لذلك فموجة الجهد تتقدم للطرف الآخر من الخط

محملة بموجة التيار المكافئ. هذا الانتشار للجهد والتيار يسمى بالموجات المسافرة.

وعندما تصل الموجات المسافرة على الخط لنقاط تغيير بالخط أي التي يكون عندها تغيير مفاجئ لعناصر الخط الكهربائي يعبر جزء من الموجة هذه النقطة ويرتد الجزء الآخر من الموجة عائداً. وهذا التغيير المفاجئ لعناصر الخط مثل:

(أ) فتح دائرة الخط. (ب) قصر في دائرة الخط.

(ج) ربط بخط آخر أو كابل. (د) ملفات معدة كهربائية... وهكذا

وعند نقطة التغيير المفاجئ تتراوح قيم التيارات والجهود بين الصفر وضعف القيمة معتمدة على خصائص طرف الخط. الموجة الساقطة على هذه النقطة تنقسم إلى موجة مرسلة وأخرى مرتدة وتتبع هذه الموجات قوانين كيرشوف والمعادلات التفاضلية للخط.

عندما تقابل الموجات الساقطة (e , i) تغييراً في المعاوقة للخط يرتد جزء من الموجة في الاتجاه المعاكس $(e` , i`)$ فإذا كانت معاوقة الخط Z_1 ومعاوقة الطرف Z_2 عندئذ تكون:

$$e` = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} e = \Gamma e \text{ .... } (17)$$

$$i` - \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} i = -\Gamma i \text{ .... } (18)$$

حيث Γ هو معامل الارتداد.

(8 – 3) تطبيقات على دالة خطوة الوحدة:

- **خط كهربائي مفتوح نهايته:**

بافتراض أن الجهد للموجة الساقطة على الخط هو:

$$e = E\,U(t)$$

وتم افتراض قيم المعاوقات الدفعية للخط الكهربائي والدائرة المفتوحة هما:

$$Z_1 = Z \;,\; Z_2 = \infty$$

حينها سوف يكون معامل الارتداد هو:

$$\Gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} = \frac{(1 - Z_1/Z_2)}{(1 + Z_1/Z_2)}$$

$$\Gamma = \frac{1 - Z/\infty}{1 + Z/\infty} = 1$$

والموجة المرتدة سوف تكون:

$$e` = \Gamma e = e = E\,U(t)$$

ومقدار جهد الموجة المرتدة:

$$e`` = (1 + \Gamma)e = 2e = 2EU(t)$$

لذلك فإن الجهد عند الطرف المفتوح حينها يرتفع ليبلغ ضعف قيمته.

- **خط كهربائي ذو نهاية مقصورة:**

عند افتراض نفس الحالة التي تم افتراضها لخط كهربائي مفتوحة نهايته فإن معامل الارتداد سوف يكون:

$$\Gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} = \frac{(0 - Z)}{(0 + Z)} = -1$$

لذلك فإن الموجة المرتدة:

$$e` = \Gamma e = -e = -E\ U(t)$$

وجهد الموجة المرسلة هي:

$$e`` = (1 + \Gamma)e = 0$$

قيمة التيار لموجة التيار المرتدة هي:

$$i` = \left| -\frac{e`}{Z} \right| = \frac{E\ U(t)}{Z}$$

أي أن قيمة الموجة المرتدة تساوي قيمة الموجة الساقطة.

وقيمة التيار الكلي عند نقطة التغيير:

$$i_0 = (i + i`) = 2i`$$

لذا فإن التيار عند نقطة التغيير يرتفع لضعف قيمة الموجة الساقطة.

(9 – 3) أمثلة محلولة:

مثال(1): خط هوائي ثلاثي الأوجه جهده 220 كيلوفولت طوله 400 كيلومتر وعناصره $R = 0.1\Omega/Km$، $L = 1.26mH/Km$

$C = 0.009mF/Km$ ، $G = 0$`

أوجد:

أ. المعاوقة الدفعية للخط.

ب. سرعة الانتشار للموجة بإهمال المقاومة.

ج. إذا ضربت موجة جهد دفعية قيمتها 150 كيلوفولت، وموجة ذيل طويلة جداً طرف خط النقل، احسب الزمن الذي تأخذه الموجة الدفعية للوصول إلى الطرف الأخر من الخط.

الحل:

$$L = 1.26 \times 10^{-3}\ H/Km\ ,\ R = 0.1\ \Omega/Km$$

$$C = 0.009 \times 10^{-6}\ F/Km$$

أ. سرعة الموجة V:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{1.26\times 10^{-3}\times 0.009\times 10^{-6}}} = 3 \times 10^{5}\ Km/s$$

ب. المعاوقة الدفعية للخط Z:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1.26\times 10^{-3}}{0.009\times 10^{-6}}} = 374.2\ \Omega$$

ج. زمن وصول الموجة الدفعية للطرف الآخر من الخط t:

$$t = \frac{line.length}{v} = \frac{400}{3\times 10^5} = 1.33 \times 10^{-3}\ s$$

مثال (2): خط نقل كهربائي له معاوقة دفعية مقدارها 500Ω متصل بكابل أرضي معاوقته الدفعية 60Ω في الطرف الآخر للخط. إذا تحركت موجة دفعية مقدارها 500KV على طول الخط لنقطة الربط مع الكابل، أوجد الجهد المبني عند نقطة الربط.

الحل:

$$Z_1 = 60\ \Omega\ ,\ Z_2 = 500\ \Omega\ ,\ e = 500\ U(t)KV$$

معامل الارتداد Γ:

$$\Gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} = \frac{500-60}{500+60} = 0.786$$

قيمة الجهد المرسل ``e:

$$e`` = (1 + \Gamma)e = (1 + 0.786) \times 500 = 893\ KV$$

(10 – 3) حماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق:

لحماية خطوط النقل يتم من خلال وضع تصميم مناسب للخط ووضع خطوط حماية أرضية ومن خلال استخدام مانعات صواعق مناسبة أيضاً.

كما يمكن تجنب الزيادة المفاجئة على الشبكة الكهربائية الناتجة عن الصواعق الكهربائية من خلال تجنبها أو التقليل من آثارها السلبية من خلال اتخاذ عدة تدابير من أبرزها:

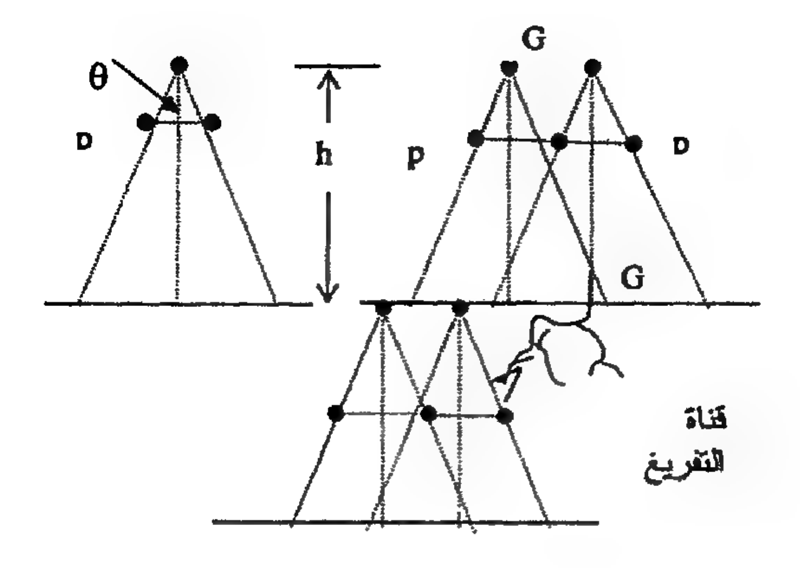
أ) حماية الخطوط الهوائية باستخدام خطوط أرضية على الأوجه لخطوط النقل.

ب) استخدام القضبان الأرضية.

ج) استخدام أجهزة الحماية مثل ثغرات التفريغ، أنابيب الحماية على الخطوط، ومانعات الصواعق عند نهايات الخطوط وكذلك في محطات التحويل أيضاً.

(1 – 10 – 3) الحماية باستخدام خطوط الحماية:

الخط الأرضي هو موصل كهربائي موجود على التوازي مع الموصلات الرئيسية لخط النقل الكهربائي الموضوعة على نفس البرج ومؤرض عند كل الأبراج المتساوية الأبعاد والمنتظمة. ويكون الخط الأرضي موجوداً أعلى الخطوط الرئيسية لخط النقل الكهربائي. هذا الخط الأرضي يعمل على حماية خط النقل الكهربائي من الشحنات المتولدة من السحب وكذلك من تفريغ الصواعق الكهربائية. ويوضح الشكل (8– 3) شكل الخط الأرضي بالنسبة لخطوط النقل.



شكل (8 – 3) ترتيب الحماية للخطوط الكهربائية

ويمكن شرح كيفية حماية الخط الأرضي للخطوط الكهربائية كما يلي:

بفرض أن السحابة الموجبة الشحنة موجودة أعلى الخط فإنها توجد شحنات كهربائية تأثيرية سالبة على الجزء من الخط الكهربائي والموجود أسفل منها. وبوجود الخط الأرضي مع الخط الكهربائي فإن كلاً منهما سيكتسب شحنات تأثيرية ولكن الخط الأرضي يكون مؤرضاً عند مسافات منتظمة لهذا فإن الشحنات التأثيرية المتولدة على الخط الأرضي تسرب للأرض عند نقاط التأريض ويكون فرق الجهد بين الخط الأرضي والسحابة وبين الخط الأرضي والخط الكهربائي متناسباً عكسياً مع السعة بينهما.

وحيث أن الخط الأرضي أقرب للخط الكهربائي فإن الشحنات التأثيرية عليه تكون قليلة جداً ولذلك فإن الارتفاع في الجهد يكون بسيطاً

جداً. وتعتمد الحماية الفعالة للخط الأرضي على ارتفاع الخط الأرضي عن سطح الأرض وزاوية الحماية (غالباً تكون 30^0).

(2 – 10 – 3) الحماية باستخدام قضبان التأريض وأسلاك الموازنة العكسية:

عند حماية الخطوط الكهربائية بالخط الأرضي فإن الصاعقة الكهربائية تضرب إما البرج أو الخط الأرضي. وفي هذه الحالة فإن مسار الشحنات للأرض من خلال البرج للأرض أو من خلال الخط الأرضي بالاتجاهات العكسية من نقطة الضرب. لذلك فإن الخط الأرضي يقلل من الجهد اللحظي لأعلى البرج حيث تكون مسار تيار الصاعقة في ثلاث اتجاهات. الجهد اللحظي لأعلى البرج يكون:

$$Z_\Gamma = \frac{I_0\, Z_\Gamma}{(1 + \frac{Z_\Gamma}{Z_S})}$$

حيث أن Z_Γ هي معاوقة الدفعة للبرج وZ_S هي معاوقة الدفعة للخط الأرضي. لو قللنا من قيمة معاوقة الدفعة للبرج والتي هي في نفس الوقت معاوقة تأريض البرج فإن جهد الدفعة سيقل في نفس الوقت.

القضبان الأرضية التي تستخدم يكون قطرها حوالي 15مم وطولها يتراوح 2.5 إلى 3 متر وفي الأرض الصلبة يزداد طول القضيب ويمكن أن يصل للعمق حوالي 50متر. وتصنع القضبان الأرضية عادة من الحديد المجلفن أو النحاس. ويعتمد عدد القضبان الأرضية والمسافات بينها وعمق الدفن على القيمة المطلوبة للمقاومة الأرضية.

نفس التاثير السابق يمكن الحصول عليه باستخدام أسلاك الموازنة العكسية (counter poise wires) وتدفن هذه الأسلاك على عمق يتراوح

بين 0.5 إلى 1.0 متر وموازياً لموصلات خطوط النقل الكهربائي وتوصل بأرجل الأبراج. طول هذه الأسلاك يتراوح بين 50 و100 متر. وقد وجد أن هذه الأسلاك أكثر فعالية من القضبان الأرضية وتقلل قيمة معاوقة الصاعقة بفعالية والتي يمكن أن تصل إلى 25 اوم. ولا يؤثر عمق الدفن على مقاومة الأسلاك ولكن فقط يجب أن تدفن لعمق كافٍ لحمايتها من السرقة. ومن المطلوب استخدام أطوال أكبر أو عدد منها على التوازي بدلاً من استخدام سلك واحد ولكن من الصعب أن نضع أكثر من سلك موازنة بالمقارنة بالقضبان الأرضية.

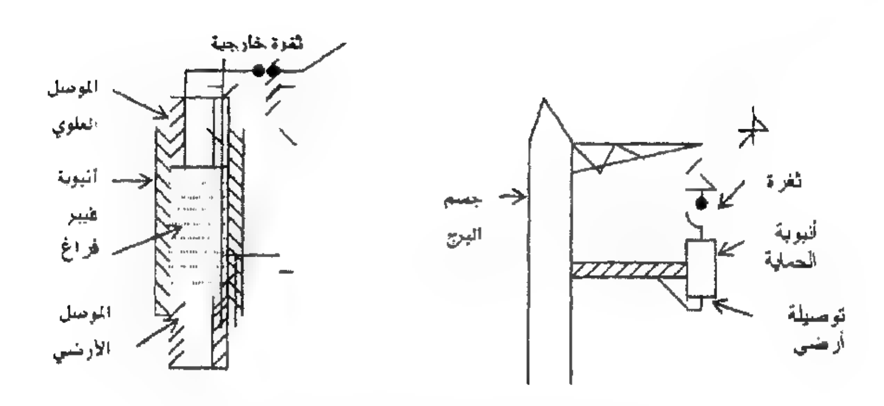
(11 – 3) الحماية باستخدام أجهزة الحماية:

في المناطق كثيفة حدوث الصواعق الكهربائية لا بد من وجود أجهزة حماية من الصواعق الكهربائية على التوازي مع الخطوط الكهربائية. وعلى الخطوط الكهربائية نستخدم نوعين من الأجهزة تعرف بثغرات الانفجار وأنابيب الحماية. وغالباً ما يثبت بأطراف الخطوط الكهربائية ونقاط التوصيل الكهربائية على الخطوط ومحطات التوزيع الكهربائية مانعات الصواعق.

أ. ثغرات الانفجار:

ثغرات الانفجار هي أجهزة تحتوي على ثغرات الشرارة مع أجهزة إطفاء الشرارة والتي تطفىء شرارة التيار عندما تنهار الثغرات خلال الزيادة الفجائية للجهد. شكل (9 – 3) يبين ثغرة الانفجار وتتكون من ثغرة قضيب هوائية بالتوالي مع ثغرة ثانية داخل أنبوبة فيبر. في حالة حدوث جهد فجائي تنهار كل من ثغرات الشرارة على التوالي. وتحد قيمة التيار الفجائي فقط بمقاومة تأريض الأبراج والمعاوقة الدفعية للأسلاك الأرضية. وتتسبب الشرارة

الداخلية في أنبوبة الفيبر خلال التيار الدفعي في تبخر جزء صغير من مادة الفيبر وتنتج بعض الغازات. هذه الغازات الناتجة تكون خليطاً من بخار الماء ومنتجات تحلل مادة الفيبر وتعمل على طرد نواتج الشرارة والهواء المتأين. وعندما يصل التيار المار ذو التردد للصفر تنطفئ الشرارة ويصبح المسار مفتوحاً كهربائياً ويستعيد العازل شدته ويحتفظ مرة أخرى بحالته الطبيعية.



الشكل (9 – 3) يبين تركيب أنبوبة الحماية وثغرة الانفجار

ب. انابيب الحماية:

أنابيب الحماية مماثلة لثغرة الانفجار في التركيب ومبادئ التشغيل، وتتكون أيضاً من قضيب أو ثغرة شرارة في الهواء مكونة من موصل الخط وطرف جهدها العالي وتثبت تحت الموصل على البرج. ويستبدل الفراغ الموجود بأنبوبة الانفجار بعنصر غير خطي والذي يوفر معاوقة عالية جداً عند التيارات المنخفضة وتقل المعاوقة بسرعة جداً عند التيارات العالية أو التيارات الدفعية. وعند حدوث الجهود الدفعية تنهار الثغرات الهوائية ويحد قيمة التيار بواسطة المقاومة ومقاومة الأرضي للأبراج. حيث تقل الجهود الدفعية على

الخط حتى يتساوى مع الجهد الواقع على أنبوبة الحماية. بعد تفريغ الجهد الدفعي للأرض فإن التيار المتتابع ذو التردد سوف يحد بالمقاومة العالية وبعد قيمة الصفر الطبيعي لتيار الخط الكهربائي ذو التردد تستعيد ثغرة الشرارة وبسرعة قوة العزل. وعادةً ما يكون جهد الانهيار السطحي لأنبوبة الحماية أقل من جهد الانهيار السطحي لعوازل الخط الكهربائي لذلك فهي قادرة على التفريغ الفعال للجهود الزائدة للصواعق الكهربائية.

ج. مانعات الصواعق:

مانعات الصواعق هي أجهزة تستخدم في محطات التحويل الكهربائية وعند نهايات الخطوط الكهربائية، وذلك لتفريغ الجهود الزائدة للصواعق الكهربائية والجهود الدفعية أثناء عمليات الفتح والغلق للقواطع الكهربائية. ومانعات الصواعق لها جهد انهيار سطحي أقل من أي عازل أو أجهزة بالمحطات الكهربائية، ولها القدرة أيضاً على تفريغ تيارات تتراوح بين 10 إلى 20كيلوأمبير لجهود دفعية ذات فترة زمنية طويلة ($8 -2\ \mu s$) وتيارات تتراوح بين 100 إلى250 كيلوأمبير لجهود دفعية ذات فترات زمنية قصيرة ($1–5\mu s$) تتكون مانعات الصواعق من مقاومات غير خطية على التوالي مع ثغرات شرارة والتي يمكن تمثيلها بمفاتيح سريعة العمل مصنوعة من كربيد السيليكون مصفوفة واحدة على الأخرى لجزئين أو ثلاثة يفصل بينها ثغرات شرارة. ويوضع التركيب الداخلي في محتوى من البورسلين. وتكتب خاصية العلاقة بين الجهد والتيار لعناصر المقاومة كالتالي:

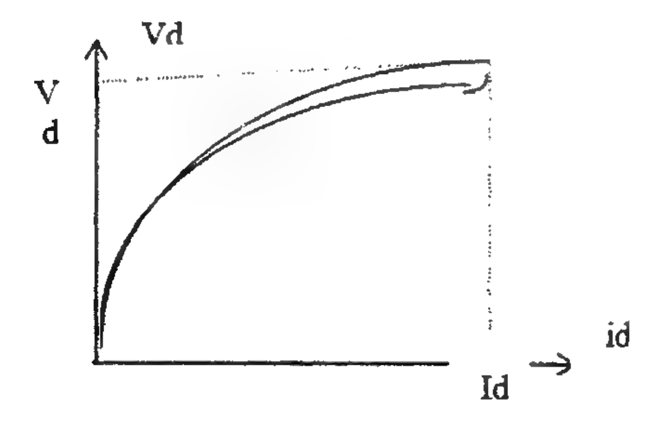
$$I = kV^a$$

حيث أن: I هو تيار التفريغ.

V هو الجهد الواقع على العنصر.

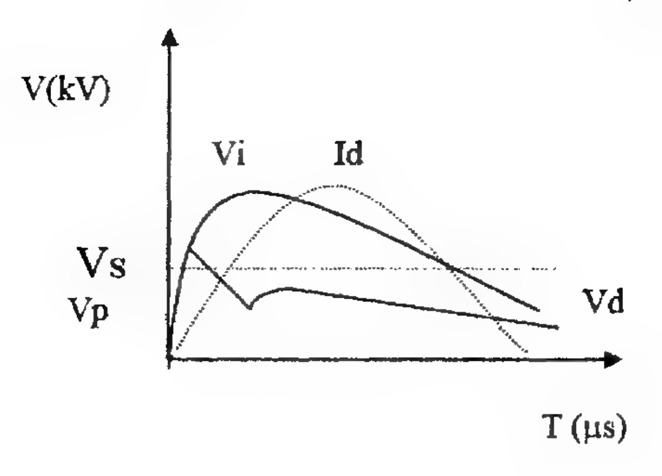
a , k عبارة عن ثوابت تعتمد على مادة وأبعاد العنصر.

وإن مانعة الصواعق تنهار (انهيار الثغرات الهوائية) عند وقوع الجهد الدفعي على مانعة الصواعق لتعطي بذلك تيار تفريغ مقداره i_d، ويكون مقدار الجهد المطبق عليها V_d لذلك فهي توفر الحماية للأجهزة بمقدار أعلى من مستوى الحماية V_p. والشكل (3 – 10) يبين لنا العلاقة بين V_d وi_d وهي خاصية الجهد على التيار للمقاومة الغير الخطية.



الشكل (3 – 10) خاصية الجهد على التيار للمقاومة الغير خطية

أما الشكل (3 –11) فيبين عمل مانعات الصواعق حيث كما نلاحظ من المنحني بأن مقدار الجهد يرتفع بشكل سريع ثم يعود إلى الانخفاض التدريجي بمدة زمنية تقاس بالميكروسكند.



الشكل (11 – 3) عمل مانعات الصواعق

التصميم البسيط لمانعات الصواعق يعمل على التيارات ذات الفترات الزمنية الصغيرة، ويعمل على تيارات تتراوح بين 100 إلى 300 أمبير لتيارات ذات تردد القوي وحوالي 5,000 أمبير للتيارات الدفعية. بينما مانعات الصواعق ذات التيارات العالية والفترات الزمنية الكبيرة والتي تعمل على التيارات الأعلى يزداد بها عدد العناصر المتوالية أو نستخدم طريقة أخرى للحد من التيارات.

في الطريقة المستعملة على نطاق واسع اليوم للحد من التيارات العالية جداً تصمم الثغرات بحيث يتم احتراق الشرارة في المجال المغناطيسي للملفات والتي تثار بواسطة تيار ذو تردد قوي. وأثناء تفريغ الصاعقة الكهربائية يتولد جهد عالٍ في الملف بواسطة مقدمة الموجة الدفعية الطويلة وتحدث الشرارة في الثغرة المساعدة. عند التيارات ذات تردد قوي تنطفئ الشرارة في الثغرة المساعدة حيث يكون الجهد على الثغرة غير كافٍ لوجود الشرارة. وتحدث شرارة الثغرة الرئيسية في المجال المغناطيسي للملفات. ويتسبب المجال المغناطيسي وشكل البوق لألكترودات الثغرة الرئيسية في إطالة الشرارة

وإطفائها بسرعة. ويحد التيار بالجهد الواقع على الشرارة وعنصر المقاومة أثناء تفريغ الجهد الدفعي ويصبح مستوى الحماية ضد الصواعق الكهربائية أقل.

في بعض الأحيان يمكن الحد من تردد القوى والجهود الزائدة الأخرى بعد عدد معين من الموجات باستخدام مانعات الصواعق. ويعتمد الجهد والزمن المسموح به على السعة الحرارية لمانعات الصواعق. ويختار الجهد المقنن لمانعات الصواعق بحيث يكون أكبر من الجهد الزائد ذو تردد القوى المتوقع (الجهد بين الخط والأرض) عند نقطة التركيب تحت أي ظروف للأخطاء أو ظروف غير طبيعية. ويعطي جدول (1 – 3) خصائص مانعات الصواعق لجهد يتراوح ما بين 200KV – 100وتيار مقداره 10KA.

الجدول (1 – 3) خصائص مانعات الصواعق 10KA وجهد من 100-200KV:

الخصائص	القيمة بالوحدة (نسبة إلى القيم المقننة لمانعات الصواعق)
1. اقصى (1.2/50 us) جهد دفعي لانهيار السطح	2.2 – 2.8
2. اكبر مقدمة موجة جهد دفعي لانهيار السطح	2.9 – 3.1
3. اكبر قيمة جهد فتح دفعي لانهيار السطح	2.3 – 3
4. اكبر جهد تفريغ (V_d) لموجة تيار (8 – 20 us)	

الخصائص	القيمة بالوحدة (نسبة إلى القيم المقننة لمانعات الصواعق)
5 KA 10 KA 20 KA	2 – 2.7 2.2 - 3 2.5 – 3.3

(12 – 3) العزل للمعدات والمحطات الكهربائية:

يمكن أن تتعدى جهود الموجات الدفعية ذات الزمن الأطول عند المحطات الكهربائية وعند مختلف النقاط على الخط الكهربائي مستوى الحماية لهذه المحطات وتعتمد هذه الموجات الدفعية على المسافة وموقع أجهزة الحماية من الصواعق.

لذلك من المهم أن نحدد عدد المواقع المطلوبة لأجهزة الحماية التي تحقق أفضل تكلفة كلية اقتصادية. وغالباً في محطات محولات الجهد العالي تركب مانعات الصواعق بين المحول الكهربائي والقاطع الخاص به لحماية المحول من عملية تقطع التيار.

والتي تتسبب في الجهود الزائدة والأكثر من ذلك فإن قرب مانعات الصواعق من المحول الكهربائي يوفر حماية أفضل للمحول. وغالباً ما يتحدد مستوى العزل الأساسي بإعطاء سماحية تقدر بحوالي 30٪ لمستوى الحماية لمانعات الصواعق واختيار مستوى الحماية الأساسية القياسي الأقرب التالي.

والجداول (2 – 3)، (3 – 3) المرفقة توضح مقدار القيم القياسية لمستوى الحماية الأساسي للجهود من 120KV ولغاية 750KV.

جدول (2 – 3) القيم القياسية لمستوى الحماية الأساسي للجهود من KV120 ولغاية KV750:

أعلى جهد للمعدات الكهربائية بالنظام (KV rms)	الجهد الدفعي الذي تتحمله المعدات عند تطبيق موجة جهد دفعي قياسي		جهد الوجه ذو تردد قوي والذي تتحمله المعدات بالنظام	
	عزل كامل (KV peak)	عزل منخفض (KV peak)	عزل كامل (KV rms)	عزل منخفض (KV rms)
120	650	550	275	230
		450		185
220			460	
		900		395
		820		360
360		750		325
		1300		570
		1150		510
420		1050		461
		1675		740
		1550		680
525		1425		630
		1300		570
		1800		790
750		1675		740
		1550		680
		1425		630
		2400		1100
		2100		980
		1950		920
		1800		870

جدول (3 – 3) القيم القياسية لمستوى الحماية الأساسي للجهود من KV120 ولغاية KV750:

أقصى جهد للمعدات V_m	أساس قيم جهد الوحدة	الجهد الدفعي الذي تتحمله المعدات عند تطبيق موجة جهد دفعي قياسي		جهد الوجه ذو تردد قوي والذي تتحمله المعدات بالنظام	
KV peak	$V_m \times (\sqrt{2}/\sqrt{3})$KV	عزل كامل (KV peak)	عزل منخفض (KV peak)	عزل كامل (KV rms)	عزل منخفض (KV rms)
300	245	3.06	750	1.13	850
		3.45	850	1.27	950
360	296	2.86	850	1.12	950
		3.20		1.24	1050
			950	1.12	1050
240	340	2.76		1.24	1175
			950	1.12	1050
		3.06	1050	1.24	1175
				1.12	1175
525	430			1.24	1300
		2.45	1050	1.36	1425
				1.12	1175
		2.74	1175	1.24	1300
				1.36	1425
765	625			1.12	1300
		2.08	1300	1.12	1425
				1.32	1550
		2.28	1425	1.1	1425
				1.19	1550
				1.38	1800
		2.48	1550	1.09	1550
				1.28	1800
				1.47	2100
				1.16	1800

حيث أن مستوى الحماية لعوازل محطات التحويل يعتمد على موقع المحطة ومستوى الحماية لمانعات الصواعق وخط التخصيب المستعمل.

حيث أن العوازل الكهربائية في نهاية الخط الكهربائي والقريبة من المحطات الفرعية عادةً ما توضع لتقلل من الجهود الدفعية للصواعق التي تصل للمحطات الفرعية. أما في داخل المحطات فإن مستوى العزل لقضبان التوزيع يكون عالياً جداً وذلك لضمان استمرارية تدفق القدرة الكهربائية. وتعطى القواطع والمفاتيح الكهربائية وأجهزة القياس ومحولات التيار والجهد... وهكذا مستوى الحماية الأقل التالي. وبما أن محول القوى هو الأكثر تكلفة والجهاز الحساس فإن مستوى العزل له هو الأعلى.

(3 – 13) أمثلة محلولة:

المثال التالي لمحطة محولات جهد 132 كيلوفولت وذلك لتوضيح مبادئ تنسيق العزل.

جهد النظام الأسمى: 132 KV

أعلى جهد للنظام: 145 KV

أعلى جهد للوجه: $145 \times (\sqrt{2}/\sqrt{3}) = 119\ KV_{peak}$

الجهد الدفعي للفتح المتوقع وقيمتها من الجدول 3 بالوحدة:

$3 \times 119 = 357\ KV_{peak}$

(أ) مانعات الصواعق:

الجهد المقنن: 123 KV

مقدمة موجة جهد الانهيار: $510\ KV_{peak}$

جهد التفريغ عند 10كيلوامبير

وموجة جهد دفعي 8/20 ميكرو ثانية: $443\ KV_{peak}$

(ب) المحولات:

الجهد الدفعي الذي تتحمله المحولات: $550\ KV_{peak}$

مستوى الجهد التأثيري الذي تتحمله المحولات: $230\ KV_{rms}$

سماحية الحماية من الجهد الدفعي للصواعق:

$$[(550 - 443)/443] \times 100 = 24\%$$

(ج) أجهزة الحماية من الأخطاء Switchgear:

الجهد الدفعي المتحمل: $650\ KV_{peak}$

الجهد الدفعي للصاعقة الذي تتحمله عوازل قضبان التوزيع: $650KV_{peak}$

وعند استخدام قضبان ثغرات الشرارة لحماية المحولات من الجهود الدفعية، يمكن اختيار قضبان ثغرات الشرارة ذات جهد انهيار سالب قدره 440 KV (ثغرة طولها 59 سم) لتعطي سماحية حماية قدرها 25% وتعطي حماية جيدة للجهود الدفعية التي يكون زمن مقدمتها أكبر من 2ميكرو ثانية.



التأريض

الفصل الرابع

التاريض

(4 – 1) مقدمة:

إن التأريض هو عمل اتصال مباشر ما بين الجسم المراد حمايته مع الكتلة العامة للأرض، حيث يستخدم التأريض على نطاق واسع في منظومة القوى الكهربائية، ابتداءً من محطات التوليد الكهربائية وصولاً إلى المستهلك، التأريض هو عبارة عن إحدى خطوات الحماية الكهربائية سواءً كانت حماية للمعدات والآلات أو للإنسان، حيث أن التأريض يمنع حدوث المضاعفات الخطيرة أثناء وجود أي عطل أو اضطراب داخل منظومة القدرة الكهربائية، وهو بأبسط العبارات عبارة عن آلية لإيجاد مسار ذي مقاومة صغيرة للأرض، لتفريغ هذه الشحنات الكهربائية.

وتستخدم أيضاً لحماية المنشآت ومحطات توليد وتحويل الطاقة من الصواعق الكهربائية حيث تقوم بإيجاد مسار لتفريغ التيارات العالية جداً الناجمة عن الصواعق.

وسوف نقوم بتفصيل بعض المصطلحات (التعريفات) لبعض العناصر التي سوف يتم ذكرها في هذا الفصل.

- **الكترود التأريض:**

هو عبارة عن قضيب معدني غالباً ما يكون من النحاس الأحمر، أو أي معدن آخر ذو موصلية جيدة يوضع على عمق موصى به في الأرض.

- **المقاومة الأرضية:**

هي المقاومة الأومية بين نظام الالكترودات الأرضية والأرض.

- **المقاومة النوعية للتربة:**

هي المقاومة النوعية للتربة وتقاس بالأوم/سم^2 لعينة من التربة.

- **وصلة الأرضي:**

هي عبارة عن الموصل الذي يربط الآلة المراد تأريضها مع الالكترود الأرضي.

- **خط التعادل:**

هو الخط الموصل بنقطة التعادل لملفات المحول.

(2 – 4) أنواع نظم التاريض للتمديدات الكهربائية:

يتم تحديد النظام المستخدم للتأريض طبقاً لطريقة التوصيل بالأرض ومن أكثر هذه النظم شيوعاً في التمديدات ثلاثية الأطوار هي: IT, TT, TN حيث أن حرف T الموجود في التسمية يعني التوصيل المباشر لنقطة التعادل بالأرض، وحرف I الموجود كذلك يعني عزل كل الأجزاء المكهربة عن الأرض مع توصيل نقطة التعادل بالأرض من خلال مقاومة. أما المسمى الذي يليه فيعني حرف N التوصيل المباشر للأجزاء المعرضة للمس والتي تحمل شحنة كهربائية إلى الأرض مباشرة وهي عبارة عن نقطة مستقلة عن تأريض القوى الكهربائية.

يتم تقسيم النظام TN إلى اقسام مختلفة حسب العلاقة بين خط التعادل وخط التأريض الوقائي PE او يرمز لذلك على النحو التالي:

C: يكون خط التعادل N وخط التاريض الوقائي PE منسجمان في موصل واحد مثل موصل PE N.

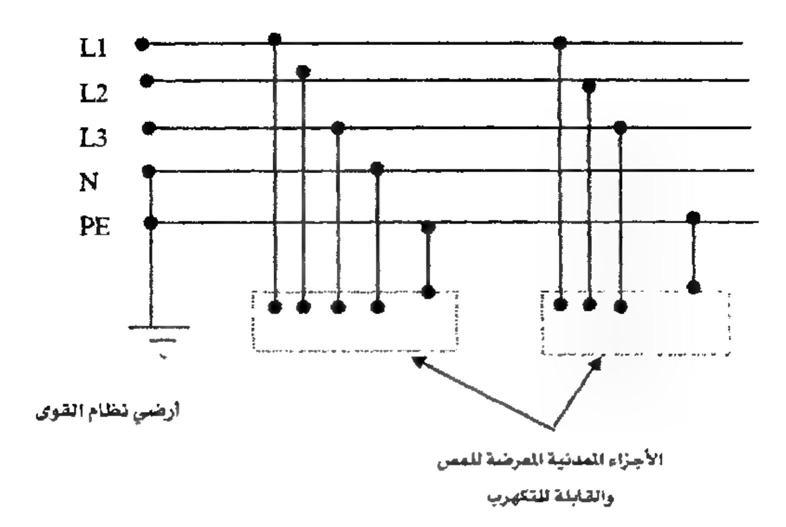
S: يكون كل من خطي التعادل والتأريض منفصلين.

(3 – 4) نظم التأريض TN:

يحتوي نظام التأريض TN على نقطة واحدة مؤرضة مباشرة على ان يتم توصيل الأجزاء المكشوفة والمعرضة للمس من التمديدات إلى هذه النقطة بواسطة موصلات وقاية، ويقسم هذا النظام حسب ترتيب موصل التعادل وموصل التأريض على النحو التالي:

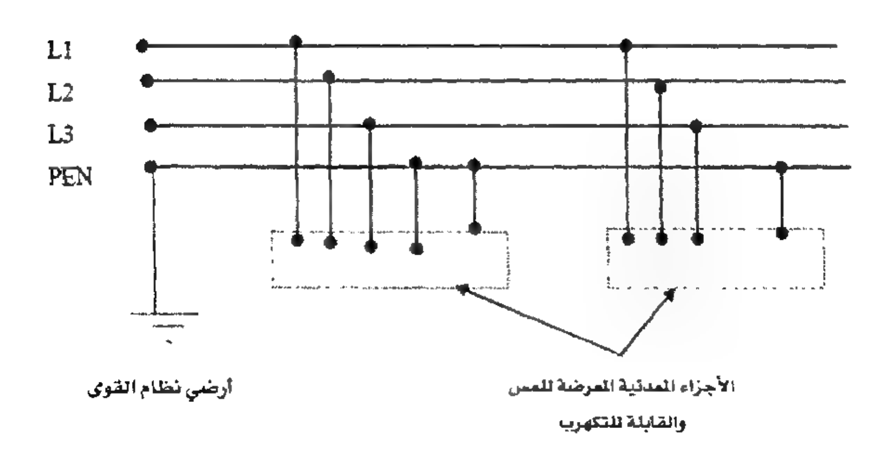
1. نظام TN – S: يكون فيه موصل التعادل منفصل عن خط التأريض.
2. نظام TN – C: تكون فيه وظائف كل من خط التعادل وخط التأريض في النظام مدمجة في موصل واحد.
3. نظام TN – C – S: حيث تكون فيه وظائف كل من خط المتعادل وخط التأريض في جزء من النظام مدمجة في موصل واحد، أما باقي النظام فتكون مفصولة كلٌ على حدى.

والشكل (1 – 4) يبين نظام TN–S حيث يوضح لنا كيفية ربط الأجزاء المعدنية المعرضة للمس مع نظام التأريض وخط التعادل.



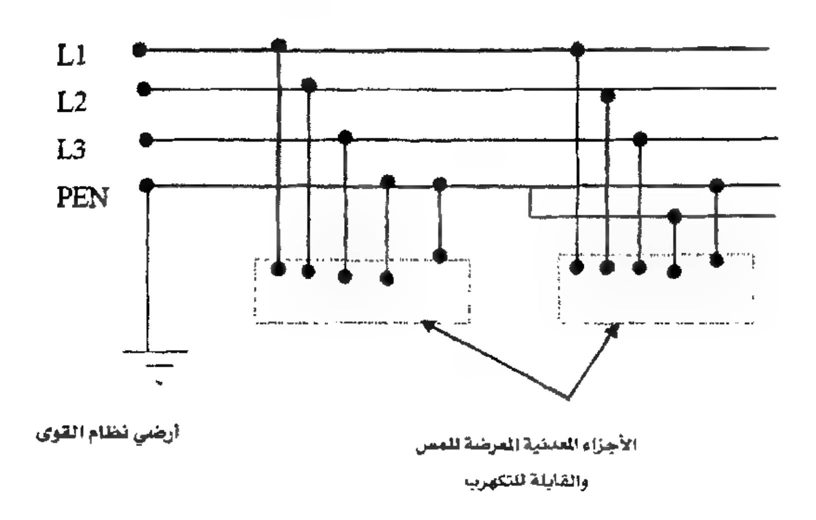
الشكل (1- 4) نظام TN – S

والشكل (2 – 4) يبين لنا نظام TN–C وكيفية التوصيل الأجزاء المعدنية المعرضة للمس، والتي قد تكون خطرة على الإنسان وكيفية توصيلها مع نظام التأريض.



الشكل (2 – 4) نظام TN – C

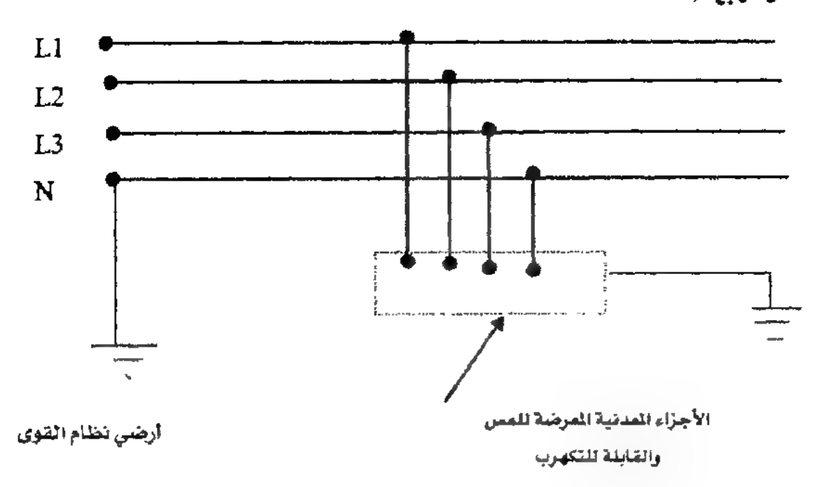
أما الشكل (3 – 4) والذي هو نظام TN-C-S يوضح كيفية توصيل الأجزاء المعدنية المعرضة للمس، والتي قد تكون خطرة على الإنسان وكيفية توصيلها مع نظام التأريض.



الشكل (3 – 4) نظام TN – C – S

(4 – 4) نظام التاريض TT:

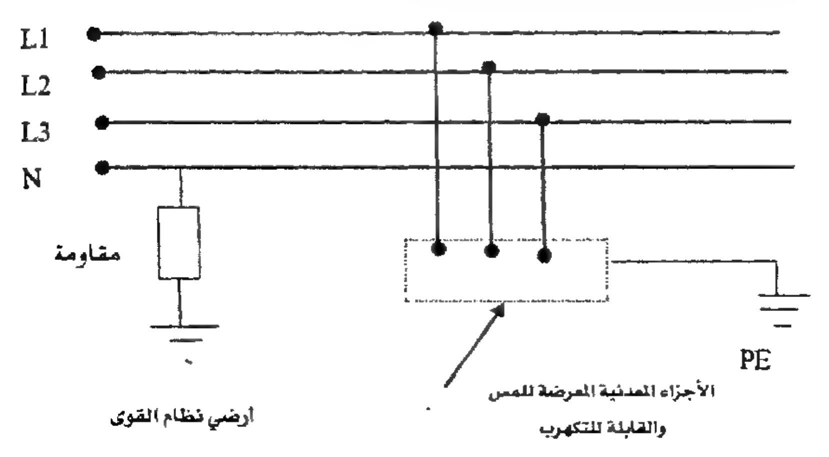
إن هذا النظام يحوي على نقطة واحدة تكون مؤرضة مباشرةً مع الأرض، ويتم وصل كل الأجزاء في التمديدات والأجسام المعدنية المعرضة للمس إلى أقطاب تأريض خاصة لا تعتمد على أقطاب التأريض في النظام الكهربائي، كما هو موضح في الشكل (4 – 4).



الشكل (4 – 4) نظام التاريض TT

(4 – 5) نظام التاريض IT:

وهذا النوع من الأنظمة لا يحتوي على اتصال مباشر بين الأجزاء الكهربائية والأرض، حيث يتم تأريض الأجزاء المعدنية في التمديدات المعرضة للمس فقط. كما هو موضح في الشكل (5 – 4).



الشكل (5 – 4) نظام IT

(6 – 4) الخصائص الفيزيائية للأرض:

إن الخصائص الفيزيائية للأرض تحوي عوامل عدة تؤثر تأثيراً مباشراً على مقدار المقاومة الأرضية للالكترود وهي:

1. طبيعة التربة.
2. نسبة الرطوبة بالتربة.
3. معدل درجة حرارة التربة.
4. عمق الدفن للاكترود الأرضي.
5. عدد الالكترودات الأرضية ومقدار المسافة بينهما.

1) طبيعة التربة:

من خلال طبيعة التربة ومكوناتها نستطيع أن نكون انطباعاً جيداً عن مقدار القيمة التقريبية للمقاومة النوعية لهذه التربة، حيث يبين الجدول المرفق العلاقة بين مكونات التربة ومقدار المقاومة النوعية.

جدول (1 – 4) المقاومة النوعية للتربة

مكونات التربة	المقاومة النوعية (أوم.متر)
التربة الطينية	40 – 50
الصلصال	≈ 200
التربة الرملية	250 – 500
الأرض الصخرية	≈ 1000

2) تأثير نسبة الرطوبة ودرجة حرارة التربة:

إن لنسبة الرطوبة ودرجة حرارة التربة تأثيراً كبيراً على قيمة المقاومة النوعية للتربة، وخاصة عند درجات حرارة مساوية أو تحت الصفر المئوي، حيث أن هذه الرطوبة تتجمد وحينها تزداد قيمة مقاومة التربة، والجدول المرفق يوضح العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة النوعية للتربة الطينية عند رطوبة نسبية مقدارها 15%.

جدول (2 – 4) العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة النوعية للتربة الطينية عند رطوبة نسبية مقدارها 15%:

درجة الحرارة	المقاومة النوعية (أوم. متر)
20	72
10	100
صفر (ماء)	140
صفر (جليد)	300
- 5	800
- 15	3250

أما العلاقة بين المقاومة النوعية للرمل المبلل ونسبة الرطوبة فالجدول (3 – 4) يبين لنا مقدارها.

جدول (3 – 4) العلاقة بين المقاومة النوعية للرمل المبلل ونسبة الرطوبة:

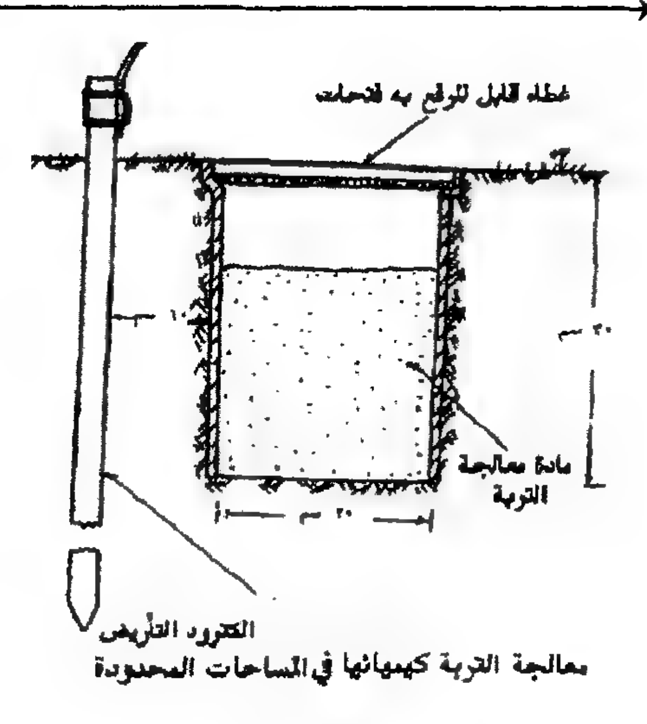
نسبة الرطوبة (%) بالوزن	المقاومة النوعية (أوم. متر)
Zero	10 M
2.5	1500
5	430
10	185
15	100
20	65
30	40

(7 – 4) المعالجة الكيميائية للتربة:

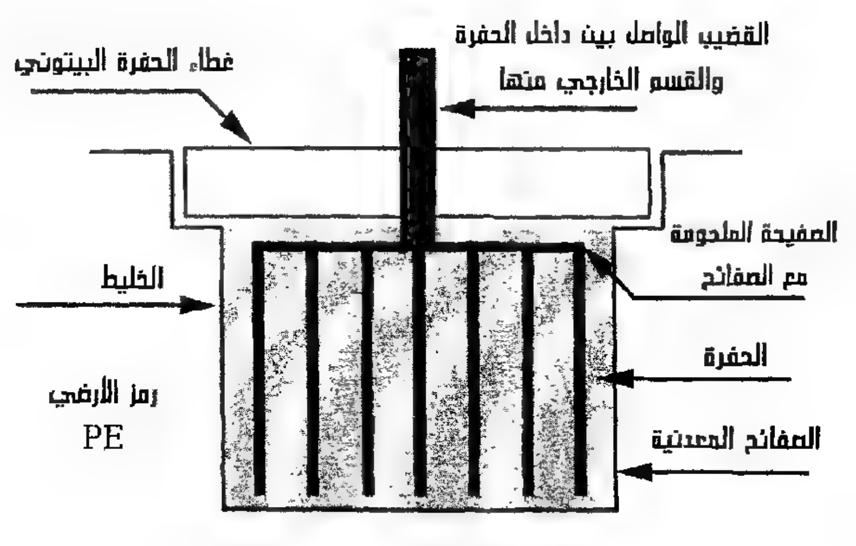
عند التعامل مع تربة ذات مقاومة أرضية مرتفعة نتيجة التعامل مع تربة صخرية أو رملية جافة فإنه يمكن القيام بمعالجة التربة كيميائياً للحصول على القيمة المطلوبة للمقاومة الأرضية. حيث من خلال المعالجة الكيميائية يمكننا تقليل قيمة المقاومة الأرضية بدرجة كبيرة قد تصل لغاية 90% من مقدار قيمة المقاومة الأرضية، ويتم ذلك من خلال إضافة الأملاح وبعض المعادن مثل:

- كبريتات المغنيسيوم.
- كبريتات النحاس.
- الفحم المخلوط بالرمل.
- برادة الحديد.

والشكل (6 – 4) يبين كيفية المعالجة الكيميائية للتربة للحصول على أقل مقاومة أرضية ممكنة لضمان تفريغ الشحنات الكهربائية الزائدة بشكل آمن وسليم.



معالجة التربة كيميائيا في المساحات المحدودة



الشكل (6 – 4) المعالجة الكيميائية للتربة

(8 – 4) إلكترود التاريض:

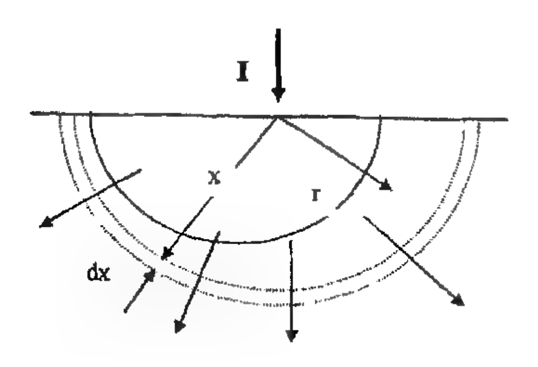
إن لإلكترود التاريض أشكال عدة. ومن ابسط هذه الأشكال هو الشكل النصف كروي، والمقاومة الأرضية لهذا الإلكترود هي عبارة عن مجموع مقاومات عدد لا نهائي من المسطحات الكروية من التربة حول الالكترود، كما هو مبين في الشكل (7 – 4).

بفرض أن تياراً مقداره i يمر للأرض من خلال هذا الإلكترود فإن هذا التيار سوف ينساب بصورة منتظمة في كل الاتجاهات خلال شرائح نصف كروية متحدة المركز ومتسلسلة. وبفرض أن كل شريحة لها نصف قطر x وسمك dx فإن المقاومة الكلية R لنصف القطر الأكبر r_1 هي:

$$R = \int_{r_2}^{r_1} \frac{\rho dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right)$$

$$R_\infty = \frac{\rho}{2\pi r}$$

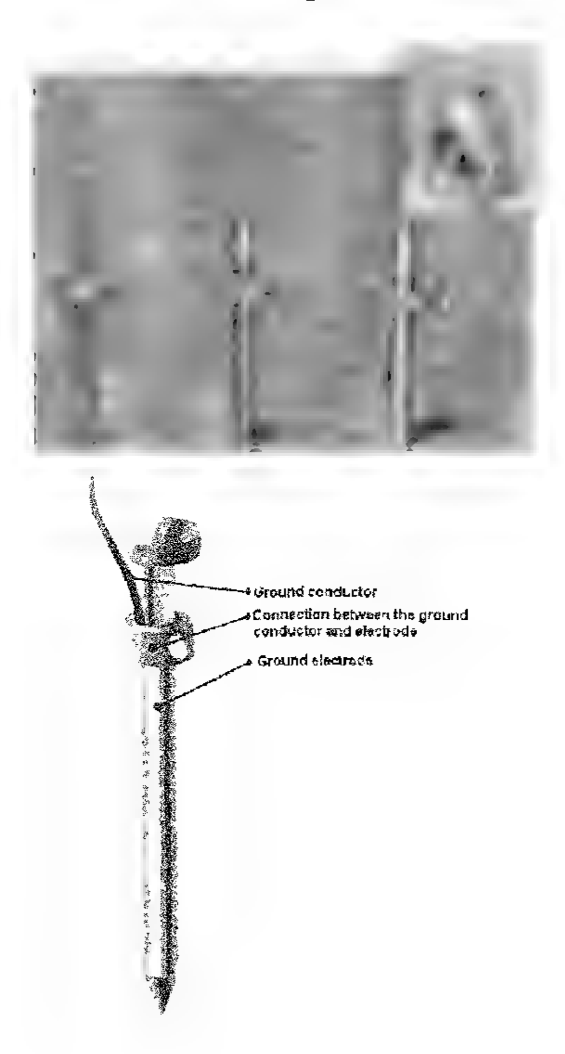
حيث أن ρ هي المقاومة النوعية للتربة. وعندما تكون $r_1 \longrightarrow \infty$



الشكل (7– 4)

(1 – 8 – 4) قضيب التأريض:

قضيب التأريض واحد من أبسط وأقل أنواع ألكترودات التأريض تكلفة اقتصادية، والمستخدم بكثرة في عمليات التأريض للشبكات الكهربائية. والصورة (8 – 4) تبين شكل الالكترود الارضي.



الصورة (8 – 4) الالكترود الارضي

ويمكننا حساب المقاومة الأرضية لقضبان التأريض لم تم تبسيطه إلى قطع ناقص كامل الدوران طول محوره الأكبر يساوي ضعف طول قضيب التأريض L وطول محوره الأصغر يساوي قطر قضيب التأريض d:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d}$$

إذا اعتبر القضيب على أنه اسطواني الشكل بنهاية نصف كروية فالعلاقة التحليلية للمقاومة الأرضية R تأخذ الشكل:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d}$$

ولو اعتبر قضيب التأريض على أنه يحمل تياراً منتظماً على طول القضيب فتصبح المعادلة كما يلي:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} [\ln(\frac{8L}{d}) - 1]$$

والمعادلات التقريبية للمقاومة الأرضية لمختلف أشكال الإلكترودات الأرضية، موضحة لكل شكل حسب الجدول (4 − 4).

الجدول (4 – 4) المعادلات التقريبية للمقاومة الأرضية لمختلف اشكال الإلكترودات الأرضية:

$R = \frac{\rho}{2\pi L}[\ln(\frac{8L}{d}) - 1]$	إلكترود ارضي	L, d
$R = \frac{\rho}{4\pi L}[\ln(\frac{8L}{d}) - 1] + \frac{\rho}{2\pi S}(1 - \frac{L^2}{3S^2})$ $R = \frac{\rho}{4\pi L}[\ln\frac{32L^2}{ds} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2}]$	إلكترودين ارضيين (S > L) (S < L)	L, S
$R = \frac{\rho}{4\pi L}[\frac{16L^2}{dh} - 2 + \frac{h}{L} - \frac{h^2}{4L^2}]$	سلك افقي	h, 2L
$R = \frac{\rho}{4\pi L}[\ln\frac{8L^2}{ah} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} - 1 + \frac{h}{L} - \frac{h^2}{4L^2}]$	شريحة افقية (سمك a والعرض b)	h, 2L
$R = \frac{\rho}{8\pi L}(\ln\frac{4L^2}{dh} + 2.9 - 2.14\frac{h}{L} + 2.6\frac{h^2}{L^2})$	اربع نقاط على هيئة نجمة	h, 2L
$R = \frac{\rho}{12\pi L}(\ln\frac{4L^2}{dh} + 6.85 - 6.26\frac{h}{L} + 7\frac{h^2}{L^2})$	ست نقاط على هيئة نجمة	h
$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D}\ln\frac{16D^2}{dh}$	حلقة سلكية قطرها D	h
$R = \frac{\rho}{4D} + \frac{\rho}{8\pi h}(1 - 0.036\frac{D^2}{h^2})$ $R = \frac{\rho}{4D} + \frac{\rho}{8\pi h}(1 + 0.018\frac{D^2}{h^2})$	لوح معدني دائري موضوع افقياً لوح معدني دائري موضوع راسياً	D, h

(9 – 4) جهد الخطوة وجهد اللمس من محول:

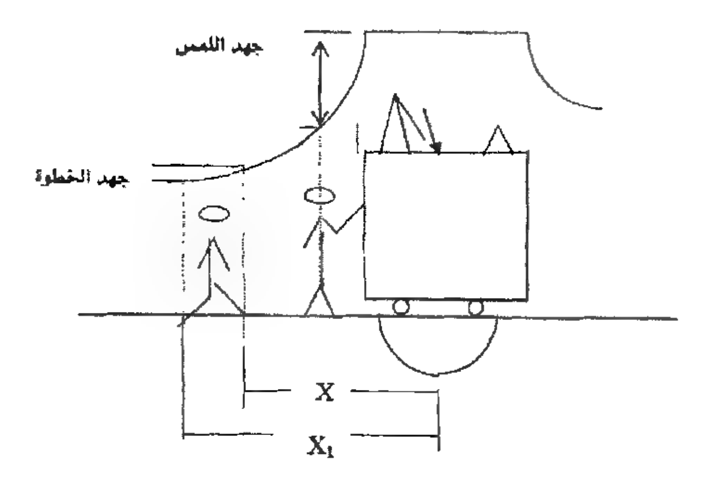
نفترض أن هناك محول بمحطة محولات موصل جسمه الخارجي بالأرض خلال إلكترود أرضي نصف كروي، شكل (9 – 4) لو حدث قصر على عازلات المحول ذات الجهد العالي فسوف يمر تيار مقداره I للأرض.

بافتراض أن نصف قطر الكرة R فإن جهد جسم المحول يكون:

$$V = I \frac{\rho}{2\pi R}$$

لذلك إذا وجد شخص بجوار المحول لحظة حدوث القصر ويكون ملامساً لجسم المحول فإن الجهد الواقع على جسمه يكون مساوياً لجهد جسم المحول ويسمى في هذه الحالة بجهد اللمس.

أما إذا كان الشخص واقفاً على مسافة من المحول وإحدى قدميه على مسافة X والأخرى على مسافة X_1.



الشكل (9 – 4)

فإن الجهد الواقع على جسمه يسمى جهد الخطوة ويساوي:

$$V_{step} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X_1}\right)$$

هذه الجهود الواقعة على الجسم يمكن أن تصل إلى قيم خطيرة على حياة الأشخاص والفنيين المتواجدين بالمحطات الكهربائية ولذلك يجب أن يصمم نظام التأريض ليكون آمناً للأشخاص والفنيين العاملين داخل محطات الكهرباء.

(10 – 4) امثلة محلولة:

مثال: محول قوى كهربائية تم تأريضه بواسطة إلكترود نصف كروي نصف قطره 0.5 متر في تربة لها مقاومة نوعية 120 أوم. متر حدث قصر بين موصل الجهد العالي والأرض ومر تيار قصر مقداره 1500 أمبير.

احسب:

أ) جهد جسم المحول عند لحظة القصر.

ب) فرق الجهد عبر شخص واقف بالقرب من المحول بحيث أن إحدى قدميه على بعد 4 متر من المحول والأخرى على بعد 4.8 متر من المحول.

الحل: $r = 0.5m$ ، $\rho = 120\ \Omega.m$ ، $I = 1500\ A$

ا) جهد اللمس:

$$V = \frac{\rho}{2\pi r} = \frac{120\times1500}{2\pi\times0.5} = 57295.8\ \text{v} = 57.2958\ \text{KV}$$

ب) جهد الخطوة:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2}\right) = \frac{120\times1500}{2\pi}\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{4.8}\right) = 1193.66\ \text{V}$$

$$= 1.193\ \text{KV}$$

(11 – 4) الاعتبارات الفنية باستخدام قضبان التأريض:

إن أنسب إلكترودات التأريض هي قضبان التأريض، حيث أن لهذه القضبان مزايا عملية على الأنواع الأخرى، وهذا المزايا تتلخص فيما يلي:

1. رخص سعرها مقارنة بالأنواع الأخرى.
2. عندما تكون الرطوبة الدائمة بالأرض على مسافات بعيدة فإن قضبان التأريض يمكن أن تصل إلى الأعماق المطلوبة مما يؤدي إلى تقليل قيمة المقاومة.
3. التوصيل بين قضيب التأريض وطرف التوصيل للأجهزة في منتهى البساطة ويمكن أن يوضع فوق سطح الأرض.
4. المعالجة الكيميائية بالمحاليل الملحية تعتبر هامة جداً، وطريقة المعالجة في حالة قضبان التأريض بسيطة وسهلة عن بقية الأنواع.
5. يمكن وضع العدد المطلوب والكافي للمقاومة الأرضية المطلوبة وفي المساحة المعينة.
6. الطول الأكبر من قضيب التأريض له الميزة بإعطاء مقاومة نوعية أقل للتربة الأرضية.

(12 – 4) نظام الإلكترودات المتعددة:

إن استخدام عدد من الإلكترودات الأرضية موصلة فيما بينها على التوازي يؤدي إلى التقليل من قيمة المقاومة الأرضية. حيث أنه في حال تم استخدام عدد (n) إلكترود متماثلين وكانت R هي قيمة المقاومة الأرضية للإلكترود الواحد وبفرض أن الإلكترودات الأرضية لا تؤثر على بعضها فإن المقاومة الكلية للإلكترودات هي:

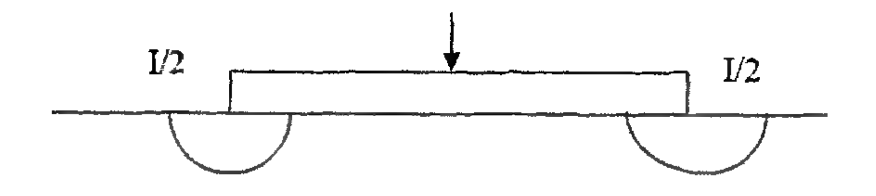
$$R_n = R/n$$

ولكن التأثير المتبادل للإلكترودات لها تأثير مباشر على القيمة المقاسة للمقاومة الأرضية. وفي هذه الحالة تكون قيمة المقاومة الكلية للإلكترودات هي:

$$R_{system} = R/(n\eta) = R_n/\eta$$

حيث أن η هي معامل الحجب وهي دائماً أقل من 1.

ويمكن حساب معامل الحجب للإلكترودين نصف كرويين، كما هو مبين في الشكل (10- 4).



الشكل (10 – 4) معامل الحجب للإلكترودين نصف كرويين

بفرض ان I هو تيار القصر وللتماثلية بين الإلكترودين فإن التيار المار في كل إلكترود سوف يكون I/2 وجهد الإلكترودين المتصلين على التوازي متساويين:

$$\therefore V = V_1 = V_{II}$$

الجهد V يساوي الجهد أثناء مرور التيار I/2 مضافاً إليه الجهد خلال مجال الإلكترود الآخر.

$$V = \frac{I}{2}\frac{\rho}{2\pi r} + \frac{I}{2}\frac{\rho}{2\pi d} = \frac{\rho I}{4\pi}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{d}\right)$$

ويمكن حساب معامل الحجب كما يلي:

$$\eta = \frac{R/2}{R_{system}} = \frac{\frac{\rho}{4\pi r}}{\frac{\rho}{4\pi}(\frac{1}{r}+\frac{1}{d})} = \frac{1}{1+(\frac{r}{d})}$$

من المعادلة السابقة نجد أن معامل الحجب η يقل بزيادة نصف قطر الإلكترود الأرضي وكذلك يقل بتقليل المسافة بين الإلكترودين.

(13 – 4) شبكة التأريض:

إن من أنسب الطرق للحصول على قيم منخفضة للمقاومة الأرضية لمحطات الكهرباء ذات الجهد العالي هي استخدام شبكة تأريض للمحطة. تستخدم في هذه الحالة مجموعة إلكترودات نحاسية تدفن بالأرض بدءاً من مسافة تتراوح بين 30 إلى 60سم من سطح الأرض وتترك مسافة تتراوح بين 3 إلى 10 متر بين الإلكترود والآخر المجاور له. وتوصل الإلكترودات ببعضها بشبكة أرضية جيدة اللحام.

تصميم حجم موصلات الشبكة الأرضية يتطلب تجنب الانصهار تحت ظروف تيار القصر. وتحسب قيمة مساحة المقطع كما هو موضح في المعادلة التالية:

$$a = 5 \times 10^{-4} I \sqrt{\frac{76t}{\ln[\frac{234+\ T_m}{234+\ T_a}]}}$$

حيث أن a هي مساحة المقطع بالـ مم^2، t هو زمن القصر بالثانية وT_m هي أقصى قيمة لدرجة الحرارة يسمح بها وT_a هي درجة حرارة الوسط المحيط.

(1 – 13 – 4) المقاومة الأرضية لشبكة التأريض:

مقاومة التأريض تحدد أقصى قيمة لارتفاع الجهد لنظام التأريض أثناء حدوث القصر. ويمكن استعمال المعادلة التالية لتحديد قيمة المقاومة الأرضية لشبكة التأريض:

$$R = \frac{\rho}{L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt{dh}} + K_1\frac{L}{\sqrt{A}} - K_2\right)$$

حيث أن L هي طول كل إلكترودات التأريض بالشبكة وA هي المساحة الكلية للشبكة وd هي قطر إلكترودات التأريض وK_1 وK_2 هي العوامل المعطاة بيانياً والدالة في النسبة بين الطول والمسافة.

(2 – 13 – 4) كيفية قياس المقاومة الأرضية:

تتكون المقاومة الأرضية عملياً من إلكترود التأريض محاطاً بجسم الأرض والتي تمتد نظرياً إلى ما لانهاية. عملياً فإن حوالي 98% من المقاومة الكلية الفعالة تكون في حدود مسافة محددة من التربة. لتحديد المسافة حول الإلكترود التي تحتوي على النسبة المعنية من المقاومة الأرضية نفترض وجود إلكترود نصف كروي. مقاومة هذا الإلكترود لمسافة r_1 هي:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right)$$

مقاومة الإلكترود لمسافة مالانهاية هي:

$$R = \frac{\rho}{2\pi}\cdot\frac{1}{r}$$

لذلك فإن:

$$\frac{R_1}{R} = \frac{\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}}{\frac{1}{r}} = 1 - \frac{r}{r_1}$$

فإذا كانت النسبة بين R_1 إلى R هي 98% فإن المساحة المحيطة بالإلكترود وتحتوي على تقريباً 98% من المقاومة الكلية هي مساحة المقاومة لهذا الإلكترود.

لعمل أي نوع من القياسات فلا بد من أخذ حقيقتين هامتين في الاعتبار هما:

1. كل مساحة المقاومة المطلوبة لا بد أن تتضمن في القياسات.
2. لو استخدم إلكترود أرضي مساعد فمن الضروري أن نتأكد أن مساحة المقاومة للإلكترود المساعد لا تتداخل مع مساحة المقاومة للإلكترود الرئيسي.

هناك نقطة أخرى هامة يجب أن تؤخذ في الاعتبار هو عدم السماح باستخدام التيار المستمر في القياس لأنه يسبب استقطاب وتحليل للتربة. لذلك من الممكن أن ينتج غازات والتي تؤثر في سريان التيار الكهربائي في التربة. لذلك فهي لا تعطي القيمة الحقيقية للمقاومة تحت الظروف العادية.

كذلك لا يسمح باستخدام قيم عالية من التيار المتردد حيث إن الفقد الكبير في القدرة الكهربائية يعطي نفس تأثيرات التيار المستمر.

(3 – 14 – 4) طريقة الثلاث نقاط:

في هذه الطريقة نستخدم اثنين من الإلكترودات المساعدة مع الإلكترود الرئيسي وتقاس المقاومة لكل الإلكترودات.

$$R_1 = X + A$$

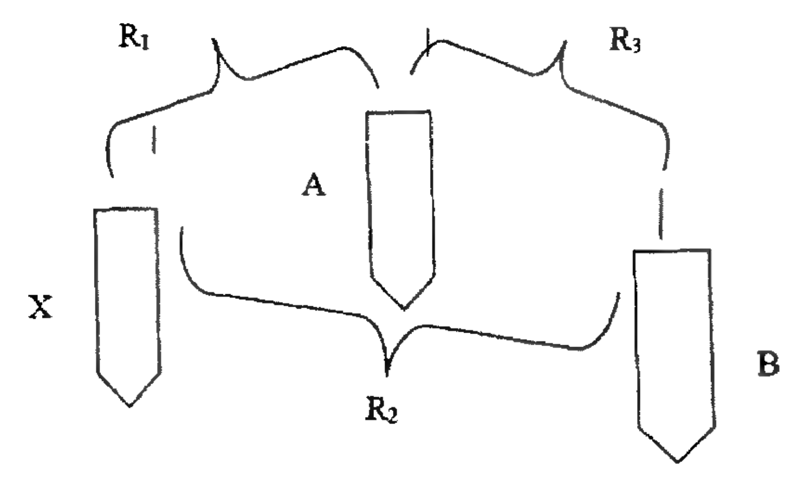
$$R_2 = X + B$$

$$R_3 = X + B$$

حيث ان R_1 المقاومة بين الإلكترود المساعد A والإلكترود الرئيسي X وR_2 المقاومة بين الإلكترود المساعد B والإلكترود الرئيسي X وR_2 المقاومة بين الإلكترود المساعد A والإلكترود المساعد B ومن العلاقات السابقة نستنتج أن:

$$X = (R_1 + R_2 + R_3)/ 2$$

والشكل (11 – 4) يبين لنا طريقة الثلاث نقاط.



الشكل (11 – 4) طريقة الثلاث نقاط

وفي هذه الطريقة لا بد من زيادة المسافة بين الإلكترودات حتى نحصل على قيمة مقاومة مقاسة ثابتة، وإن أي خطأ في قيم المقاومات المقاسة سوف يؤدي إلى خطأ ذو قيمة أعلى في قيم المقاومة المحسوبة X.

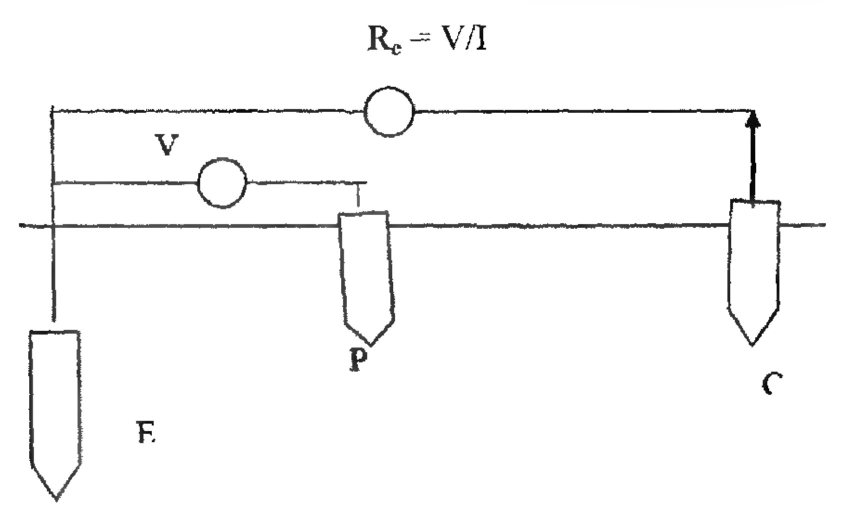
(4 – 14 – 4) طريقة انخفاض الجهد:

حيث أن هذه الطريقة هي من أكثر الطرق الشائعة في قياس مقدار المقاومة الأرضية، حيث أنه في هذه الطريقة يستخدم إلكترودين مساعدين.

P و C على مسافة مناسبة للإلكترود الرئيسي E.

بوضع مصدر كهربي له تيار معرف بين الإلكترودين E و C ويقاس فرق الجهد بين الإلكترودين E و B إذا كان التيار المار I وفرق الجهد المقاس V فإن قيمة المقاومة الأرضية تكون:

$$R_e = V/I$$



الشكل (12 – 4) طريقة انخفاض الجهد

ومن الواضح في الطريقة أن مقاومة الإلكترودات المساعدة لا تتضمن في هذه الطريقة. وإن كانت مقاومة الإلكترود C هو أحد العوامل المحددة لقيمة التيار I لكن هذا بدوره يحدد قيمة فرق الجهد V لذلك فإن المعادلة V/I غير معتمدة على قيمة مقاومة الإلكتود C.

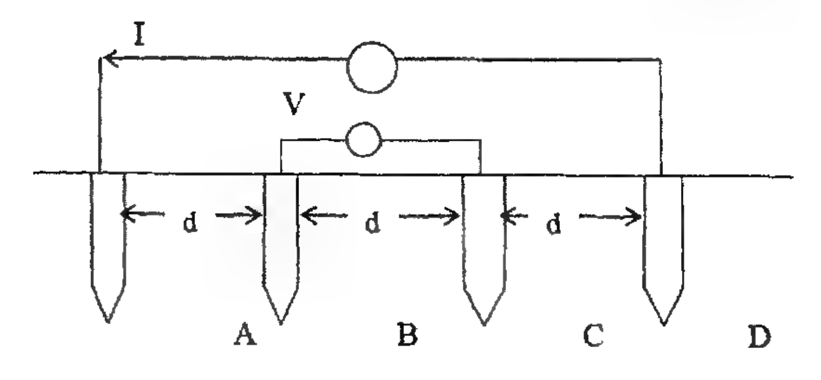
(4 – 15) قياس مقاومية الأرض:

لغرض قياس مقاومية الأرض تستخدم طريقة الأربعة إلكترودات المبينة في الشكل (4 – 13).

بإمرار تيار بين الإلكترود A والالكترود D وقياس الجهد بين الالكترود B والالكترود C يمكن معرفة قيمة مقاومية الأرض.

$$\rho = 2\pi d(V/I)$$

حيث أن ρ هي مقاومية الأرض بالأوم متر و V فرق الجهد المقاس بين B و C بالفولت و I هو التيار المار بين A و B.



الشكل (4 – 13) طريقة قياس المقاومية الأرضية

(4 – 15) امثلة محلولة:

مثال: لقياس مقاومية تربة داخل محطة توليد كهربائية جديدة استخدمت طريقة الأربعة الكترودات المسافة بين كل إلكترود والإلكترود المجاور 20 متر وقراءة جهاز قياس المقاومة الأرضية يشير إلى 1.2 أوم. احسب مقاومية التربة.

الحل:

$d = 20\ m \quad , \quad R = 1.2\ \Omega$

$R = \frac{\rho}{2\pi d} \quad \therefore \rho = R.\ (2\pi d) = 1.2 \times 2\pi \times 20 = 150.8\ \Omega.m$

الأسئلة

1. في تجربة قياس جهد الانهيار فأن وظيفة اسقاط اشعاع خارجي على المنطقة المضغوطة بالغاز هي:

أ. ايجاد الكترونات حرة
ب. زيادة الضغط
ج. ايجاد مسار لتيار الانهيار
د. لا شيء مما ذكر

2. علاقة ضغط الغاز المحيط بالمنطقة التي يتم فيها الانهيار:

أ. علاقة طردية
ب. علاقة عكسية
ج. لا علاقة بينهما
د. لا شيء مما ذكر

3. يرمز لطاقة الفوتون:

أ. hv.
ب. A.
ج. Ef.
د. لا شيء مما ذكر

4. من اهم الطرق للتأين:

أ. التأين بالتصادم
ب. التأين الضوئي
ج. التأين الحراري
د. التأين بالتفاعل بين الجزيئات

5. من الآليات التي تتسبب في زيادة الشحنة الكهربائية بين الأقطاب:

أ. كل ماذكر.
ب. الأيونات الموجبة.
ج. التأين الحراري.
د. الذرات المثارة.

6. شرط الانهيار في معادلة تاونسند هو:

أ. عندما يساوي المقام صفر.
ب. عندما يساوي البسط صفر.
ج. عندما يتساوى البسط مع المقام.
د. لا شيء مماذكر.

7. علاقة الجهد مع التيار طبقا لميكانزم تاونسند هي:

أ. طردية.
ب. عكسية.
ج. لا علاقة بينهما.
د. لاشيء مماذكر.

8. يسمى الغاز الذي تلعب فيه عملية التصاق الالكترونات دورا فعالا بغاز:

أ. سالب الكهربائية.
ب. موجب الكهربائية.
ج. مستقر الكهربائية.
د. متعادل الكهربائية.

9. الالتصاق التحللي هو:

أ. تلتصق الالكترونات مباشرة بالذرات.
ب. تتحلل الذرات.
ج. تنقسم جزيئات الغاز الى الذرات.
د. لاشيء مماذكر.

10. من اكثر العوازل السائلة المستخدمة في تطبيقات العزل بالجهد العالي هي:

أ. الهيدروكربونات الصناعية.
ب. الهيدروكربونات الهالوجينية.
ج. الأسترات.
د. الزيوت.

11. يمكن التقليل من حدوث ظاهرة التفريغ الهالي:

أ. تنعيم اسطح الموصلات.
ب. تنظيف أسطح الموصلات.
ج. زيادة ضغط الغاز.
د. كل ماذكر.

12. تتأثر ظاهرة التفريغ الهالي:

أ. حالة سطح الموصل.
ب. حالة الغاز المحيط.
ج. شكل الموصل.
د. كل ماذكر.

13. يستخدم مجال كهربائي في تطبيق ميكانيزم الانهيار في اختبارات سوائل العزل مقداره:

أ. 380 – 220 kv
ب. 220 – 120 kv
ج. 20 – 10 kv
د. 100 – 50 kv

14. العلاقة بين درجة الحرارة وعازلية سائل العزل هي علاقة:

أ. طردية.
ب. عكسية.
ج. لا علاقة بينهما.
د. لاشيء مماذكر.

15. يتم ازالة الغبار المعدني من زيوت العزل عن طريق:

أ. الطرد المركزي.
ب. التقطير.
ج. الترشيح.
د. التعامل الكيميائي.

16. تنشأ قوة تدفع بالشوائب للمساحة التي يكون فيها المجال الكهربائي أعلى ما يمكن عندما تكون:

أ. سماحية الشوائب أكبر من سماحية العازل.
ب. سماحية العازل أكبر من سماحية الشوائب.
ج. سماحية مساوية لسماحية الشوائب.
د. كل ماذكر.

17. تعتمد آلية (ميكانيزم الانهيار) لسوائل العزل على عوامل منها:

أ. الشوائب.
ب. الماء.
ج. فقاعات هوائية.
د. كل ماذكر.

18. شدة العزل للهواء تعتبر مقارنة بشدة العزل للسوائل العازلة:

أ. أقل.
ب. أكبر.
ج. متساوية.
د. لاشيء مماذكر.

19. المادة الاكثر استخداما في صناعة الشبكات الكهربائية هي:

أ. الزجاج.
ب. اللدائن.
ج. الأسيتايت.
د. الخزف.

20. يتم صناعة العوازل في درجات حرارة عالية جدا وذلك لكي:

أ. تقل مسامية المادة.
ب. يقل وزن المادة.
ج. لتلافي وجود الشوائب.
د. لصقل المادة.

21. العوازل المصنعة من سيليكات المغنيزيوم والسيليكا هي عوازل:

أ. الزجاج.
ب. اللدائن.
ج. الاسيتايت.
د. البورسلان.

22. يختلف شكل وتصميم العازل في الشبكات الهوائية باختلاف مقدار:

أ. العوامل الجوية.
ب. الحالات العابرة.
ج. الصواعق.
د. الجهد.

23. تصمم كل وحدة من عوازل التعليق لتتحمل جهد مقداره:

أ. 120 KV
ب. 66 KV
ج. 33 KV
د. 11 KV

24. إن الظاهرة التي تؤدي الى تلف العازل الكهربائي وتداخل في موجات الراديو والاتصالات تسمى بظاهرة:

أ. التأين الحراري.
ب. التفريغ الهالي.
ج. التفريغ الأرضي.
د. عدم انتظام الجهد.

25. من العوامل المؤثرة في ظاهرة التفريغ الهالي بشكل كبير:

أ. الجو المحيط.
ب. وسط الموصل.
ج. شكل الموصل.
د. كل ماذكر.

26. يتم تنقية زيت العزل من الغازات بواسطة:

أ. التقطير.
ب. التجفيف.
ج. الترشيح.
د. الطرد عن المركز.

27. يتم ازالة الرطوبة (بخار الماء) بواسطة:

أ. إضافة حمض الكبريتيك المركز.
ب. التقطير.
ج. التجفيف الفراغي.
د. لاشيء مماذكر.

28. في خلايا اختبار العوازل السائلة يتم استخدام جهد اختبار يتراوح بين:

أ. 220 – 120 KV
ب. 66 – 33 KV
ج. 33 – 11 KV
د. 100 – 50 KV

29. لا يتم استخدام اللدائن في عوازل التعليق وذلك بسبب:

أ. مرتفع الثمن.
ب. ضعفها في مقاومة الشرارة.
ج. لايقاوم العوامل المحيطة.
د. لاشيء مماذكر.

30. ان الانهيار الذي يحدث داخل العازل الصلب نتيجة وجود جيوب هوائية مفرغة داخل العازل تسمى بظاهرة:

أ. التشجير.
ب. لب العازل.
ج. الانهيار الكهروميكانيكي.
د. لاشيء مماذكر.

31. يغمر الورق العازل بعد تجفيفه في مركب خاص من مشتقات البترول وذلك:

أ. لزيادة ثابت العزل النسبي.
ب. لضمان عدم اشتعاله.
ج. لضمان عدم تلفه.
د. كل ماذكر.

32. تستخدم شرائح البولي بروبلين في عزم المعدات الكهربائية وذلك بسبب:

أ. كل ماذكر.
ب. ذات شدة ميكانيكية عالية.
ج. سماحية منخفضة.
د. تتحمل درجات حرارة عالية.

33. يتم استخدام الألياف لأغراض العزل وذلك بسبب:

أ. الخواص الميكانيكية
ب. الخواص الكهربائية
ج. رخص الثمن
د. كل ماذكر

34. اذا افترضنا بأن القيم المتوسطة للسحب الرعدية هي سرعة فصل الشحنات 20 m/sec، وزمن ظهور الوميض 20 sec، وكان العزم الكهربائي 110 كولوم. كم والثابت الزمني لهما 20 ثانية، فسوف تكون قيمة الشحنات المنفصلة هي:

أ. 20 m/sec
ب. 15 m/sec
ج. 10 m/sec
د. 25 m/sec

35. ان الصواعق التي تنشأ وتتحرك في اتجاه الأرض وتنتهي قبل وصولها الأرض تسمى:

أ. الصواعق القيادية.
ب. الصواعق المكررة.
ج. الصواعق المستمرة.
د. الصواعق المرتدة.

36. الأيونات الموجبة الناتجة من التأين داخل الثغرة بين الأقطاب تتحرك في اتجاه:

أ. المهبط.
ب. المصعد.
ج. حركة دورانية.
د. حركة أفقية.

37. ان اجتذاب الكترونات حرة الحركة الى الذرة المتعادلة كهربائيا وتكوين أيون سالب تسمى:

أ. ظاهرة التصاق الالكترونات.
ب. ظاهرة التنافر الالكتروني.
ج. ظاهرة التعادل الالكتروني.
د. لاشيء مماذكر.

38. من أكثر العوازل الغازية شيوعا في المعدات الكهربائية:

أ. النيتروجين
ب. ثاني أكسيد الكربون
ج. سادس فلوريد الكبريت
د. الفريون

39. من الخصائص الواجب توافرها في الغاز العازل:

أ. قابل للاشتعال.
ب. تكلفة اقتصادية عالية.
ج. ضار بالصحة العامة.
د. لاشيء مماذكر.

40. ان عازل البورسلان يتحمل قوة شد ميكانيكي لغاية:

أ. $500kg/cm^2$
ب. $150kg/cm^2$
ج. $250kg/cm^2$
د. $50kg/cm^2$

41. تستخدم عوازل البورسلان والمشكلة على شكل مايسمى بالفنجان في الشبكات التي لايتجاوز مقدار الجهد بها:

أ. 1KV
ب. 11KV
ج. 33KV
د. 5KV

42. يتصف العازل السماري عند استخدامه كعزل تعليق في الجهود العالية بأنه:

أ. بسيط التركيب.
ب. معقد التركيب وثقيل الوزن.
ج. خفيف الوزن.
د. لاشيء مماذكر.

43. عند استخدام خطوط ثنائية أو ثلاثية الأسلاك في منظومة نقل القدرة الكهربائية التي تستخدم بها عوازل تعليق فان تكلفة العوازل:

أ. تزداد.

ب. تقل.

ج. لازيادة في الكلفة.

د. لاشيء مماذكر.

44. النظام الذي لا يحتوي على اتصال مباشر بين الأجزاء الكهربائية والأرض، ويتم تأريض الأجزاء المعدنية المعرضة للمس فقط هو نظام:

أ. IT

ب. TT

ج. TN-C-S

د. TN-C

45. ان مقدار المقاومة الأرضية للالكترود تعتمد على عوامل منها:

أ. طبيعة التربة.

ب. نسبة الرطوبة في التربة.

ج. معدل درجة حرارة التربة.

د. كل ماذكر.

46. ان نظام التأريض الذي يكون فيه موصل التعادل منفصل من خط التأريض هو النظام الذي يطلق عليه اسم:

أ. TN-C
ب. TN-C-S
ج. TN-S
د. لاشيء مماذكر

47. ان التربة التي تتميز بأعلى مقاومة هي:

أ. التربة الطينية.
ب. الصلصال.
ج. التربة الرملية.
د. الأرض الصخرية.

48. لمحول قوى كهربائية تم تأريضه بواسطة الكترود نصف كروي مقدار نصف قطره $0.5m$، في تربة لها مقاومة نوعية مقدارها $120\Omega.m$، وكان مقدار تيار القصر $1.5KA$، فان جهد اللمس سوف يكون:

أ. 57.25KV
ب. 114.50KV
ج. 60KV
د. 7.5KV

49. لنفس السؤال السابق فان مقدار فرق الجهد عبر شخص يقف بالقرب من المحول، أحد قدميه على بعد 4m والأخرى 4.8m من المحول، فان جهد الخطوة سوف يكون:

أ. 11.93KV
ب. 119.3KV
ج. 1.193KV
د. 3.911KV

50. الاعتبارات القيمة الواجب توافرها في قضبان التاريض:

أ. رخيصة الثمن.
ب. معقدة التركيب.
ج. تتأثر في الظروف المحيطة.
د. لاشيء مماذكر.

51. يتم استخدام حجم موصلات الشبكة الأرضية بحيث يستطيع التغلب على:

أ. الانصهار.
ب. الصدأ.
ج. التجمد.
د. لاشيء مماذكر.

52. يتم تصميم شبكة التأريض على اعتبار:

أ. أقصى قيمة لارتفاع الجهد.
ب. اقصى قيمة للتردد.
ج. اقصى قيمة للمقاومة الأرضية.
د. كل ماذكر.

53. لعزل موصلات كوابل الجهد العالي عن الأرض يتم إستخدام:

أ. الكرتون.
ب. الورق المشبع بالزيت
ج. القطن.
د. الورق الجاف.

54. ينجم عن ظاهرة الكورونا في الخطوط الهوائية سماع صوت أزير بالإضافة إلى ظهور هالة باللون:

أ. الأحمر.
ب. الأصفر.
ج. البنفسجي.
د. الأصفر.

55. إن عوازل التعليق صممت بحيث تتحمل كل وحدة عازلة جهداً مقداره:

أ. 11 KV
ب. 25 KV
ج. 33 KV
د. 1 KV

56. إن التأخير الزمني لأنهيار الغازات هو الزمن:

أ. الكلي اللازم لحدوث الأنهيار.
ب. اللازم لحدوث الأنهيار بعد ظهور الألكترون الأولي.
ج. اللازم لظهور الألكترون الأولي بعد تطبيق الجهد.
د. اللازم لوصول الأيونات الموجبة إلى الكاثود.

57. إن الحرارة المتولدة في المادة العازلة الصلبة بين تطبيق مجال كهربائي يتناسب:

أ. طردياً مع ربع شدة المجال الكهربائي.
ب. طردياً مع شدة المجال الكهربائي.
ج. عكسياً مع ربع شدة المجال الكهربائي.
د. عكسياً مع شدة المجال الكهربائي.

58. إن الأنهيار الذي يحدث للعازل الصلب عند مدة زمنية اقل ما يمكن هو الأنهيار:

أ. الكيماوي.
ب. الكهروكمياوي
ج. التأكل
د. الكهروميكانيكي

59. الجهاز المستخدم للحماية من البرق والمكون من مقاومة غير خطية يسمى:

أ. الأنبوب الحامي.
ب. الثغرة القطبية.
ج. قاطع إعادة الأغلاق.
د. الثغرة الطاردة.

60. لتقليل مقاومة شبكة تأريض مكونة من ثلاثة قضبان عامودية يتم وصل هذه القضبان على:

أ. مثلثي.
ب. التوالي.
ج. التوازي.
د. توالي – توازي.

61. إن سعة شبكة التأريض:

أ. تقل بزيادة المقاومة النوعية للتربة.
ب. تزيد بزيادة المقاومة النوعية للتربة.
ج. لا تعتمد على المقاومة النوعية للتربة.
د. تهمل في حالة تربة مقاومتها النوعية عالية جداً.

62. يتم التخلص من الغازات المتحللة في نظام تنقية السوائل العازلة عن طريق:

أ. عامود التقطير.
ب. الفلتر.
ج. التجفيف.
د. برج التبريد.

63. تمتاز السوائل العازلة بأنها:

أ. سهلة التركيب
ب. تستخدم كوسيلة تبريد
ج. ذو قابلية إستقطاب عالية جداً.
د. ثابت العزل النسبي لها أكبر بكثير من العوازل الصلبة.

64. إن منحنى باشن لأنهيار الغازات هو منحنى:

أ. خطي يبدأ من الصفر.
ب. خطي لا يبدأ من الصفر.
ج. غير خطي يبدأ من الصفر.
د. غير خطي له قيمة أصغرية.

65. يقاس معامل تاونسند لأنهيار الغازات بوحدة:

أ. Torr.cm

ب. Cm

ج. ليس له وحدة.

د. أوم.

66. عند تعبئة المكثف بمادة الزيت بدلاً من الهواء فأن سعته:

أ. تزداد سعة المكثف.

ب. تقل سعة المكثف.

ج. تبقى ثابتة سعة المكثف.

د. ثابت العازلية يقل.

المصادر والمراجع

1. د. أحمد حلمي راشد، د. اسر علي ذكي، نظم التوزيع ونظم الجهد، منشأة المعارف بالاسكندرية، 1984.

2. د. أحمد حلمي راشد، د. اسر علي ذكي، التأريض الوقائي، منشأة المعارف بالاسكندرية 1983.

3. د. محمد المرسي، الكهرباء والمغناطيسية، فيزياء 102.

4. M.Abdel-Salam, H.Anis, A. El-Morshedy and R.Radwan High Voltage Engineering, Theory and practice, 2nd ed.

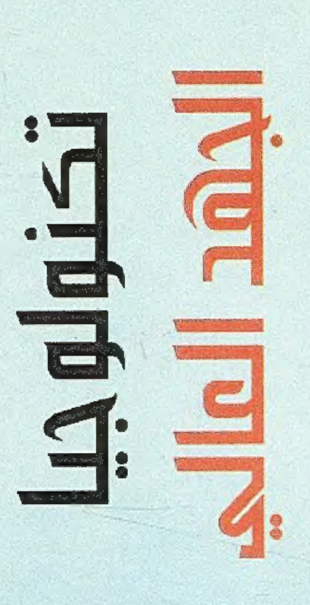
5. D.kind, High-Volltage Experimental Technique, 1st ed Friieder. Vieweg & Shon, Braunschweigh, 1978.

6. L.H.Van Valack, Elements of meterials Science and Engineering, Addision-Wesley Publishing company, 1975.

7. http://cdd.gotevot.edu.sa

8. Elements of power System Analysis, W.D. Sterensan, Mc Graw Hill International Edition.

9. P. as Begamudre, Extra High vollage Ac transmission Enginnering , Gohn Wiley & Sons, New yourk, 1986.







خلوي 5651920 79 962+ ص.ب 8244 الرمز البريدي 11121 جبل الحسين الشرقي
www.muj-arabi-pub.com
E-mail:Moj_pub@hotmail.com





دار الإعصار العلمي للنشر والتوزيع
الاردن - عمان - مرج الحمام - شارع الكنيسة - مقابل كلية القدس
هاتف 0096265713906 فاكس 0096265713907
www.dar-aleasar.com